

JNRIUT N° 4 – JUIN 2013

**JOURNAL NATIONAL
DE LA
RECHERCHE EN IUT**

N° 4

**Publié par le laboratoire de Recherche Pluridisciplinaire du
Nord-Est de Midi-Pyrénées (IUT TOULOUSE II – Figeac)**

Avant-propos

La récente enquête réalisée par l'ADIUT prouve le grand dynamisme scientifique des IUT, que ce soit par la performance mesurée par les critères d'évaluation traditionnels ou par leur capacité à inscrire leurs travaux de recherche dans une logique de partenariat technologique avec l'environnement économique et industriel local. Ces partenariats concernent les entreprises et organisations, les laboratoires (souvent hébergés par les IUT) mais aussi les collectivités locales qui soutiennent ces initiatives porteuses de développement pour leur territoire.

Ce dynamisme se traduit par des contractualisations fréquentes avec des entreprises en vue d'applications. Le transfert de technologie constitue ainsi une dynamique forte de territoire et apporte des solutions aux entreprises (souvent aux PMI-PME) confortant leur existence et leur place sur le marché. Ces partenariats peuvent contribuer au financement des laboratoires ou des plateformes technologiques.

L'implantation de ces plateformes d'innovation et de recherche, outils scientifiques de proximité, doit être un objectif général pour l'ensemble des IUT, et, en particulier, pour les IUT implantés dans des petites villes au sein desquelles les acteurs locaux ne bénéficient pas de la proximité des grands centres de recherche et s'inscrivent souvent dans une logique de niche.

La recherche est donc un élément essentiel de l'appartenance des IUT à l'enseignement supérieur universitaire. Plus de 5000 enseignants-chercheurs sont affectés en IUT et plus d'une centaine de laboratoires sont implantés ou ont une antenne dans un IUT.

Je salue le travail considérable mené par notre collègue Thierry Simon, de l'IUT de Figeac, qui, par son acharnement, permet à ce journal de vivre et d'assurer une publication annuelle. Je remercie aussi Jackie Bacqué pour son investissement dans la réalisation de ce numéro.

Olivier Drouard-Pascarel
Directeur de l'IUT de Figeac



Chères collègues, chers collègues,

Vous trouverez dans ce numéro 4 du Journal National de la Recherche en IUT les articles issus de la nouvelle formule d'échange de nos préoccupations de recherche, le Congrès National de la Recherche en IUT, qui s'est déroulé à l'IUT de Tours. Les auteurs ont fait un travail important de réaction pour présenter les travaux de ce numéro. Je les remercie vivement pour leur contribution.

Je ne suis pas encore en capacité de vous proposer un deuxième numéro par an, toutes les choses prennent du temps dans les petites structures, le comité de lecture qui devait faire apparaître la richesse de nos thématiques et de nos pratiques, n'est pas constitué. Je manquerai pas de faire appel vous pour le compléter.

Je souhaite que nous puissions dans l'avenir encore former des étudiants, techniciens supérieurs universitaires, en leur faisant partager nos savoirs élaborés dans les équipes de recherche en activité dans les IUT et en lien avec les Universités.

Très cordialement.

Thierry SIMON
Directeur de publication
Directeur du LRPmip

Journal national de la recherche en IUT

Premier numéro paru en 2009

Parution annuelle

ISSN : 2107-5549

Publié par le **Laboratoire de recherche pluridisciplinaire du Nord-Est de Midi-Pyrénées (LRPMip)**

Adresse :

IUT de Figeac

Avenue de Nayrac

46100 Figeac

Tél. 05 65 50 30 68

Fax 05 65 50 30 61

Courrier électronique : lrpmip@univ-tlse2.fr

Directeur de la publication : Thierry Simon

Mise en page et corrections : Jackie Bacquié

Conception et réalisation : Magalie Garros - Service imprimerie – Université de Toulouse II-Le Mirail

Crédit photographique (Couverture) : Marie-Christine Reitz-Sanfins

SOMMAIRE

Pouvoir pathogène ou protecteur des bactéries Pseudomonas fluorescens issues de l'environnement ou de milieux hospitaliers Page 1

Dorian Bergeau, Daniel Sperandio, Victorien Decoin, Nicole Orange, Sylvie Mazurier, Annabelle Merieau, Maïté Vicré-Gibouin, Xavier Latour

Conception d'une plateforme pluridisciplinaire ouverte et évolutive pour l'évaluation des technologies d'aide au maintien à domicile Page 13

Eric Campo, Xavier Daran, Adrien Van Den Bossche

Thérapies innovantes dans le cancer broncho-pulmonaire Page 23

Virginie Hervé, Pascale Reverdiau

De la psychologie au marketing : Doit-on adapter les échelles des psychologues au comportement du client en magasin ? Le cas des émotions Page 33

Patrice Cottet, Marie-Christine Lichtlé et Véronique Plichon

Etude d'une bougie à double étincelle pour la combustion propre Page 49

Dragos Astanei, Stéphane Pellerin, Bogdan Hnatiuc, François Faubert, Nuno Cerqueira, Marius Ursache

*Diagnostic moléculaire des champignons contaminants de l'habitat : le cas particulier de **Serpula lacrymans*** Page 63

Charlotte Marin-Laot, Christophe Lambert, Georges Barbier, Gaétan Le Floch

Modélisation d'une batterie Li-Ion pour véhicules électriques Page 97

Lucas Cicero, HarryRamenah, Camel Tanougast, Philippe Jean, Pierre Milhas et Abbas Dandache

L'indépendance des banques pendant l'Entre-deux-guerres : une analyse quantitative Page 113

Nathalie Lévy, Eric Dehay

Microorganismes et matériaux cimentaires : dégradation et protection Page 125

Sébastien Roux, André Lecomte, Françoise Feugeas

Sensibilité et limite de détection de micro capteurs RMN : aspects méthodologiques Page 141

L. Fakri-Bouchet, D. M. Hoang, A. Kadjo, T. Cong Truong, Y. Zaim Wadghiri, D. Graveron-Demilly

Architecture bilatérale pour un système de télé-échographie robotisé avec un retour d'effort Page 157

Juan Sebastián Sandoval, Laurence Josserand, Cyril Novales, Aicha Fonte, Pierre Vieyres

Systèmes complexes et plan global de secours : vers un plan global qualité, hygiène, sécurité et environnement Page 173

Mehdi Tahan, Jean Vareille, Laurent Nana, Olivier Danjean,
Lt-Colonel Hervé Mahoudo, Gilles Cloarec

Les problématiques identitaires de la communication territoriale Page 195

Laurent Sempé, Jean-Paul Seloudre

Approche pluridisciplinaire pour la conception de systèmes sociotechniques résilients Page 221

Philippe Rauffet, Gael Morel, Christine Chauvin, Pascal Berruet

Pouvoir pathogène ou protecteur des bactéries *Pseudomonas fluorescens* issues de l'environnement ou de milieux hospitaliers

Dorian Bergeau*, Daniel Sperandio*, Victorien Decoin*, Nicole Orange, Sylvie Mazurier***, Annabelle Merieau*, Maïté Vicré-Gibouin****, Xavier Latour***

• *Normandie Université - Université de Rouen EA 4312 - IUT Evreux -
Laboratoire de Microbiologie Signaux et Microenvironnement (LMSM)
55 rue Saint Germain, 27000 Evreux.*

**** Plate-Forme de Technologie Normandie Sécurité Sanitaire (N2S), IUT Evreux, 55 rue Saint-Germain, 27000 Evreux.*

****INRA, UMR Agroécologie, 17 rue Sully, BV 68510, 21065 Dijon, Cedex.*

*****Laboratoire de Glycobiologie et Matrice Extracellulaire Végétale (GlycoMEV), PRES Normandie Université, EA 4338 Université de Rouen, 76821 Mont-Saint-Aignan.*

Correspondance : xavier.latour@univ-rouen.fr

Section de rattachement : 64/65

Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ : La bactérie *Pseudomonas fluorescens*, ubiquiste dans l'environnement, est surtout présente à la surface des plantes et considérée comme inoffensive pour l'Homme. Au contraire, certains isolats sont utilisés pour protéger les cultures grâce à la lutte biologique. Pourtant, l'apparition récente d'isolats sensiblement pathogènes humains, détectés en milieux hospitaliers, a alerté les chercheurs sur la capacité d'adaptation de ces bactéries et leur risque sanitaire. Dans cette étude pluridisciplinaire, nous avons comparé l'aptitude d'isolats hospitaliers et environnementaux à s'adapter à différentes températures et à provoquer une interaction avec la cellule eucaryote végétale ou humaine. Les résultats d'acclimatation thermique et d'hémolyse montrent sans équivoque l'adaptation des isolats hospitaliers à leur hôte humain et donc un risque. Quelques isolats agronomiques engendrent eux une réaction de défense chez la plante sans pour autant provoquer la maladie, un résultat intéressant pour la protection des végétaux.

MOTS-CLÉS : *Pseudomonas fluorescens*, pouvoir pathogène, pouvoir protecteur, système de sécrétion de type III, hémolyse, réaction hypersensible.

1. Introduction

Les bactéries du groupe des *Pseudomonas* spp. fluorescents sont des bactéries à Gram négatif présentant une grande diversité et colonisant les milieux aériens, aquatiques et telluriques. Elles sont nommées ainsi pour leur capacité à synthétiser des sidérophores fluorescents sous lumières ultra-violettes (Figure 1). Parmi les espèces majeures du groupe, on trouve des bactéries saprophytes vivant au contact des plantes à très forte densité (10^6 à 10^9 UFC/g de racine) et qualifiées ainsi de « rhizobactéries » ; ici les espèces les plus représentées du groupe sont *Pseudomonas fluorescens* et *Pseudomonas putida*.

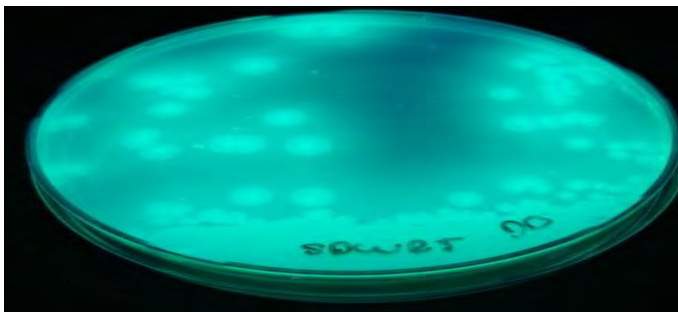


Figure 1. Colonies bactériennes de *Pseudomonas fluorescens* engendrant une fluorescence sous éclairage U.V. car cultivées en milieu carencé en fer

Ces rhizobactéries sont très mobiles grâce à leurs multiples flagelles polaires et psychrotrophes car capables de croître à des températures fraîches, classiques des milieux environnementaux. Même si la plupart apparaissent neutres, certaines souches sont bénéfiques des plantes car elles produisent des phytohormones stimulants la croissance des végétaux (auxines) ou sont antagonistes d'agents pathogènes bactériens et fongiques (compétition pour le fer, antibiose, induction systémique de résistance chez la plante). Ces souches sont alors utilisées comme agents de lutte biologique visant à remplacer les produits phytosanitaires de synthèse (Latour *et al.*, 2009 ; Diallo *et al.*, 2011).

D'autres espèces du groupe des *Pseudomonas* spp. fluorescents sont, au contraire, pathogènes. Les bactéries *Pseudomonas aeruginosa* sont des pathogènes animaux et humains bien connus, responsables d'infections nosocomiales sévères voire mortelles pour les patients atteints de mucoviscidose. Elles sont retrouvées essentiellement en milieux hospitaliers et dans les environnements contaminés par les déjections animales ou anthropiques (Cornelis, 2004). Les bactéries *Pseudomonas syringae* sont elles responsables de nombreux dégâts sur cultures d'intérêts agronomiques (tomates, betteraves, pommes, etc...). Ce sont des bactéries épiphytes dont la densité augmente lors de phénomènes de virulence associant un pathovar bactérien particulier à une espèce végétale sensible qui est attaquée (Robin Buell *et al.*, 2003) *Pseudomonas aeruginosa* et *P. syringae* ont la particularité commune d'interagir avec les cellules hôtes eucaryotes, respectivement animales et végétales, *via* des structures appelées « systèmes de sécrétion de type III » (SST3).

Les SST3 forment des aiguilles plus ou moins longues (60 à 200 nm) soudées à la bactérie par un complexe protéique basal traversant la membrane interne, le périplasme et la membrane externe (Tampakaki *et*

al., 2004). Ces systèmes deviennent opérationnels lorsqu'une protéine particulière, le translocon, se fixe au sommet de l'aiguille et vient s'intégrer dans la membrane de la cellule hôte, permettant le transfert dans celle-ci des protéines effectrices bactériennes. Les SST3 ont vocation à injecter dans le cytoplasme de la cellule eucaryote des protéines effectrices dont le rôle est d'inhiber les défenses et de détourner la machinerie cellulaire de l'hôte en faveur du pathogène. Ces systèmes sont donc directement liés à la virulence bactérienne et fortement impliqués dans le succès de la colonisation de l'hôte. D'un point de vue évolutif, il s'agit d'un exemple adaptatif de certains procaryotes visant à mener une interaction physique directe avec leur cible eucaryote.

Malheureusement, la frontière entre espèces saprophytes et pathogènes est parfois ténue. Cela semble être le cas chez l'espèce *P. fluorescens*. En effet, depuis une dizaine d'années, des souches de *P. fluorescens* ont aussi été isolées de patients atteints d'infections nosocomiales (expectorations) ou de sangs contaminés (hémolyses). Ces résultats laissent craindre une adaptation particulière de certaines souches à l'hôte humain et donc à sa température chaude régulée (Chapalain *et al.*, 2008).

L'objectif de notre étude a été de comparer le potentiel infectieux de différents isolats de *P. fluorescens* issus de diverses plantes ou d'hôpitaux universitaires. Des températures de croissance cardinales ainsi que des tests de virulence associés à la présence de SST3 ont ainsi été imposés à une collection de 24 isolats représentatifs de ces milieux et à 3 souches de référence.

2. Évaluation du potentiel infectieux de *P. fluorescens*

Pour cette étude, nous avons d'abord entrepris de caractériser les 2 groupes d'isolats bactériens (Tableau 1). Le premier groupe provient d'hémocultures (H-Hemo-), d'abcès (H-Abc-) ou d'expectorations (H-Exp-) de patients hospitalisés en Centre Hospitaliers Universitaires, lieux où ces isolats ont été caractérisés comme appartenant à l'espèce *P. fluorescens*. Le second est constitué d'isolats issus de racines de cinq espèces végétales cultivées dans des sols variés : maïs (A-Maïs-), tomate (A-Tom-), betterave (A-Bett-), lin (A-Lin-) et luzerne (A-Luz-). Ces derniers ont été préalablement étudiés et sélectionnés par le partenaire

institutionnel agronomique (INRA de Dijon). À ce panel ont été ajoutées comme témoins trois souches de référence. Une souche de *P. aeruginosa* (souche PAO1, isolée d'un patient brûlé consécutivement atteint par une maladie nosocomiale) et une souche de *P. syringae* (souche DC3000, isolée d'un plant de tomate malade) : ces souches détentrices de SST3 sont nos témoins pathogènes respectivement animaux et végétaux. La 3^e souche est la référence internationale taxonomique de l'espèce *P. fluorescens* (souche-type non pathogène dépourvue de SST3, issue de la collection Française de Bactéries associées aux Plantes).

2.1. Caractéristiques thermiques des isolats de *P. fluorescens*

Les bactéries précédemment isolées ont été testées pour leur capacité à se multiplier sur milieux liquides (préférés aux milieux gélifiés car mimant mieux les fluides corporels ou végétaux) ceci à trois températures caractéristiques. Les résultats présentés dans le tableau 1 soulignent une dichotomie des résultats. En effet, bien que tous les isolats appartiennent à la même espèce (*P. fluorescens*), ils ne présentent pas les mêmes phénotypes de croissance. On peut souligner ici l'incapacité des isolats issus d'hémocultures à croître à 4°C, la croissance à cette température basse, rencontrée fréquemment dans l'environnement extérieur, en particulier de nuit, étant caractéristique des bactéries psychrotrophes. Par ailleurs, on peut observer une croissance de tous les isolats hospitaliers à la température corporelle humaine (37°C) alors que cette espèce n'est pas mésophile au contraire du pathogène humain, *P. aeruginosa*. Plus étonnant encore, un des isolats hospitaliers peut aussi se multiplier à 41°C, s'il a été préalablement habitué (c'est-à-dire si une préculture a été réalisée à 37°C), cette élévation de température mimant l'apparition d'un épisode fébrile. Ces premiers résultats présentent donc la variabilité de thermorégulation de croissance que l'on peut retrouver chez les isolats de l'espèce *P. fluorescens*. Ils révèlent également une adaptation au milieu à partir duquel, les isolats ont été extraits.

Bactéries	Températures de croissance			
	4°C	37°C	41°C adaptées	
<i>P. fluorescens</i> ^T	+	-	-	Souches de références
<i>P. aeruginosa</i> PAO1	-	+	+	
<i>P. syringae</i> DC3000	+	-	-	
H-Hemo1	-	+	+	Isolats hospitaliers
H-Hemo2	-	+	-	
H-Hemo3	-	+	-	
H-Hemo4	-	+	-	
H-Hemo5	-	+	-	
H-Hemo6	-	+	-	
H-Absc7	+	+	-	
H-Exp8	-	+	-	
H-Exp9	+	+	-	
H-Exp10	+	+	-	
H-Exp11	+	+	-	
H-Exp12	+	+	-	
A-Lin-1	+	+	-	Isolats agronomiques
A-Bett-2	+	-	-	
A-Bett-3	+	-	-	
A-Maïs-4	+	-	-	
A-Maïs-5	+	-	-	
A-Maïs-6	+	-	-	
A-Maïs-7	+	+	-	
A-Tom-8	+	-	-	
A-Tom-9	+	-	-	
A-Luz-10	+	-	-	
A-Luz-11	+	+	-	
A-Luz-12	+	+	-	

Tableau 1. Capacité des isolats hospitaliers et environnementaux de *P. fluorescens* à croître en milieu liquide à 4°C, 37°C et 41°C après adaptation pour cette dernière à 37°C.

(Afin d'aider le lecteur, les résultats plus marquants ont été grisés)

2.2. Potentiel infectieux animal de *P. fluorescens* : hémolyse

Afin de mettre en évidence la présence ou non de SST3 fonctionnels, un test d'hémolyse associé aux cellules (cHA) a été réalisé (Figure 2). Lorsque le translocon des SST3 entre en contact avec la fragile

membrane des hématies, il perce cette membrane et provoque un éclatement du globule rouge. Le pourcentage de cHA (cell Hemolytic Associated) observé dans ce test est donc dépendant de la présence de SST3 que les bactéries peuvent exprimer à leur surface. Nous avons utilisé dans nos tests un détergent (SDS à 0.1%) qui provoque la lyse totale des hématies et qui représente donc le 100% de cHA (témoin positif). Toutes les souches isolées ont été testées pour leur capacité à produire des T3SS fonctionnels contre les cellules animales et donc à induire l'éclatement des hématies. Les résultats d'hémolyses obtenus sont présentés ci-dessous. Là encore, des différences claires apparaissent selon l'origine des isolats (Figure 2). Habituellement, les *P. fluorescens* ne sont pas porteurs de SST3 et, en effet, les souches isolées de l'environnement n'ont quasiment aucun effet sur les hématies. Au contraire, une majorité des bactéries hospitalières induisent l'éclatement des globules de façon plus ou moins prononcée. Par ailleurs, la plupart des isolats hospitaliers ont un pouvoir infectieux supérieur à celui de la souche de référence *P. aeruginosa* PAO1, souche dont le pouvoir pathogène a cependant été atténué au cours de ses cultures répétées au laboratoire.

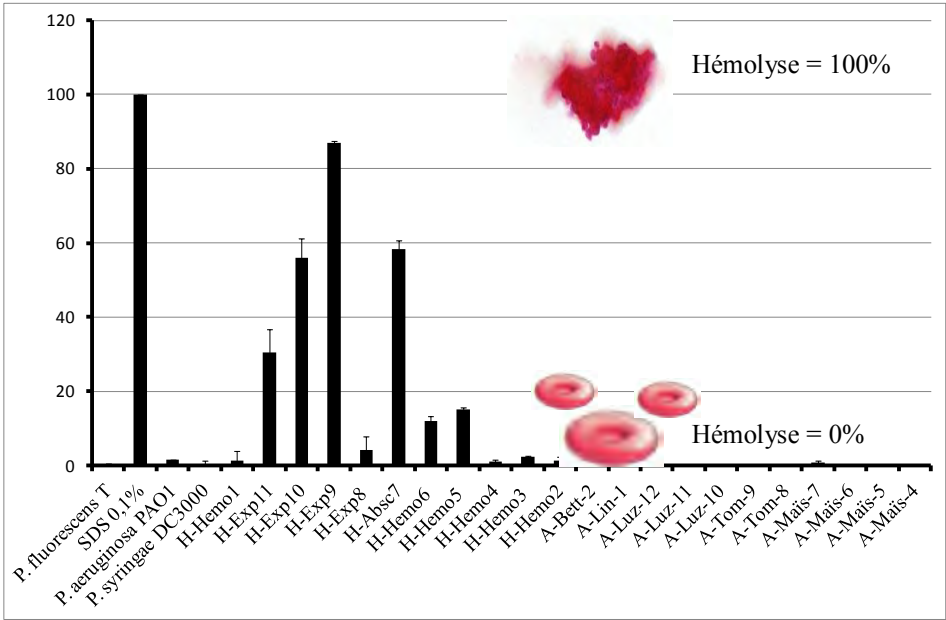


Figure 2. Hémolyse par contact avec les différents isolats bactériens appartenant aux 2 groupes étudiés, *P. fluorescens* hospitaliers et *P. fluorescens* issus de plantes.

2.3. Potentiel infectieux végétal de *P. fluorescens* : réaction d'hypersensibilité sur feuille de tabac

L'espèce *P. fluorescens* est reconnue comme non pathogène des plantes. Aucun des 24 isolats étudiés n'a ainsi été capable d'induire une maladie chez toutes les espèces végétales cultivées en serres, au contraire de la souche témoin phytopathogène de *P. syringae* agresseur de la tomate (Robin Buell *et al.*, 2003). Dans ce contexte, il est connu que les SST3 sont responsables de la maladie chez les plantes sensibles mais aussi de la réaction d'hypersensibilité (HR) chez les plantes résistantes (Viollet *et al.*, 2011). En effet, les plantes résistantes sont capables de reconnaître, *via* leur système de défense, les protéines effectrices (avirulentes) sécrétées par le SST3. Lorsque ces protéines sont détectées, une voie de transduction de signal est activée et, en réponse, la plante forme une zone de nécrose localisée à l'endroit où les protéines ont été détectées (Figure 3A). La plante empêche ainsi la bactérie de contourner ses défenses et de se répandre dans tout l'organisme.

Pour tester la présence de SST3 fonctionnels actifs dans les cellules végétales, les souches de *P. fluorescens* de notre collection ont été inoculées à des feuilles de plants de tabac (cette espèce possédant un excellent système immunitaire). Les réponses HR sont observées entre 24 et 48h. Deux *P. fluorescens* isolés du lin et de la betterave (Figure 3C et 3D) ont induit une HR chez le tabac, similaire à la nécrose engendrée par le témoin *P. syringae* (Figure 3B). Ces 2 isolats possèdent donc un SST3 fonctionnel par lequel transitent des effecteurs reconnus par l'hôte. Ils sont alors capables d'induire les défenses de la plante sans pour autant être pathogène (comme mentionné auparavant). Ce résultat ambigu montre l'existence d'une interaction intime à clarifier entre cette espèce bactérienne les végétaux supérieurs.

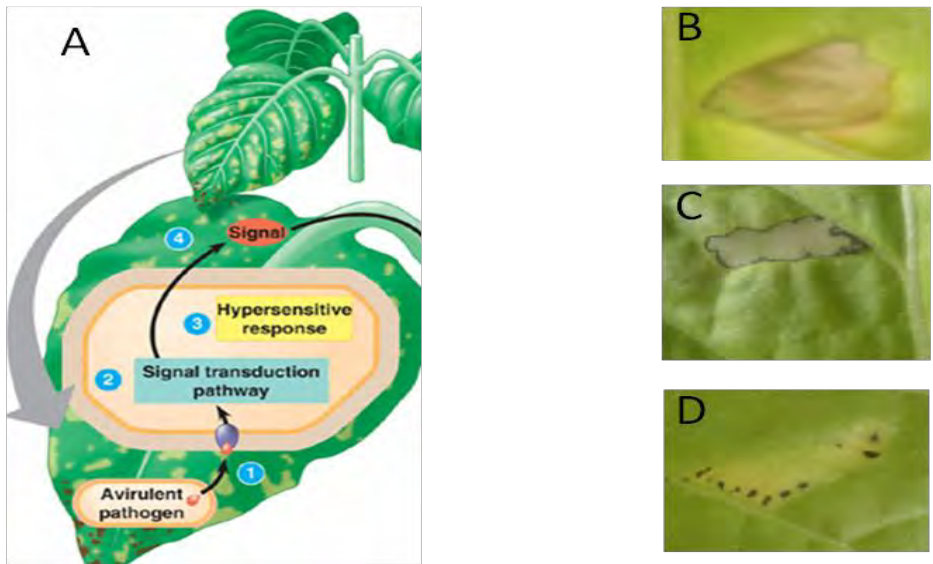


Figure 3. Mécanisme de la réaction d'hypersensibilité (HR) observée chez les plantes résistantes (A) et réponses HR induites par le témoin positif *P. syringae* DC3000 (B), et les isolats de *P. fluorescens* A-Lin-1 (C) et A-Bett-3 (D).

3. Conclusion et perspectives

La bactérie *P. fluorescens* est considérée comme inoffensive pour l'Homme et, au contraire, peut aider celui-ci à protéger ses cultures (Latour *et al.*, 2009). L'apparition récente d'isolats pathogènes détectés en milieux hospitaliers modifie notre perception idyllique de ce microorganisme. Les résultats d'acclimatation thermique et d'hémolyse montrent sans équivoque la capacité d'adaptation de certains isolats à des hôtes homéothermes, estimés pourtant comme hostiles à leur installation (températures élevées, réponse du système immunitaire). Certains autres isolats environnementaux, plus rares, ont également acquis les gènes codants pour le SST3 et des effecteurs permettant d'induire une alerte chez la plante, sans provoquer la maladie chez celle-ci. Ces résultats montrent la plasticité du génome de l'espèce *P. fluorescens* et son aptitude à s'adapter à son microenvironnement. Celles-ci justifient l'existence d'un risque sanitaire mais aussi un intérêt pour la lutte microbiologique comme stimulateur des défenses des plantes. D'autres

études demeurent donc nécessaires avant de pouvoir utiliser ces isolats environnementaux.

Les travaux présentés dans cette étude illustrent à la fois la pluridisciplinarité des recherches et les partenariats établis au sein des IUT pour mener à bien cette recherche. Ainsi, les connaissances nécessaires pour mener nos essais et leur bibliographie touchent à la fois aux domaines médicaux (physiologie humaine, maladies nosocomiales) et agronomiques (phytopathologie, phytoprotection). Nos travaux résultent ainsi d'une collaboration entre différents laboratoires universitaires (LMSM de l'IUT d'Evreux *-origine des travaux, bactériologie, lutte biologique*, laboratoire GlycoMEV de l'université de Rouen *-mécanismes de défense des plantes*), des centres de recherches plus appliqués (INRA de Dijon *-isolement et caractérisation des isolats agronomiques*, C.H.U. *-isolement et caractérisation des isolats hospitaliers*), le tout associé à une Plate-Forme de Technologie labellisée (Normandie Sécurité Sanitaire <http://n2s.fr/>, *-mise en relation des partenaires, aide technique*) dont la proximité avec le laboratoire concepteur des travaux, sur le site de l'IUT Evreux, a facilité la collaboration.

Remerciements : les auteurs tiennent à remercier le Ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur ainsi que la région Haute-Normandie qui financent ces travaux via un programme du GRR Végétal, Agronomie, Sols et Innovation (VASI).

Bibliographie :

Chapalain A-L., Rossignol G., Lesouhaitier O., Merieau A., Gruffaz C., Guerillon J., Meyer J.-M., Orange N., Feuilloley M.G.J., « Comparative study of 7 fluorescent pseudomonad clinical isolates », Can. J. Microbiol., vol. 54, 2008, p. 19-27.

Cornelis G. R., «The type III secretion injectisome», Nature Reviews Microbiology, vol. 4, 2004, p. 811-825.

Diallo S., Crépin A., Barbey C., Orange N., Burini J.F., Latour X., « Mechanisms and recent advances in biological control mediated through the potato rhizosphere », FEMS Microbiology Ecology, vol. 75, Issue 3, 2011, p. 351-364.

Latour X., Delorme S., Mirleau P., Lemanceau P., « Identification of traits implicated in the rhizosphere competence of fluorescent pseudomonads: description of a strategy based on population and model strain studies », Sustainable Agriculture, 2009, p. 285-296.

Robin Buell C., Joardar V., Lindeberg M., Selengut J., Paulsen I.T., Collmer A., « The complete genome sequence of the *Arabidopsis* and tomato pathogen *Pseudomonas syringae* tomato DC3000», PNAS, vol. 100, n°18, 2003, p. 10181-10186.

Tampakaki A. P., Fadouloglou V. E., Gazi A. D., Panopoulos N. J., Kokkinidis M., « Conserved features of type III secretion», Cellular Microbiology, vol. 6, 2004, p. 805-816.

Viollet A., Corberand T., Mougél C., Robin A., Lemanceau P., Mazurier S., « Fluorescent pseudomonads harboring type III secretion genes are enriched in the mycorrhizosphere of *Medicago truncatula*», FEMSEC, 2011, p. 1-12.



Mr Bergeau Dorian est actuellement doctorant au Laboratoire de Microbiologie Signaux et Microenvironnement (EA 4312 LMSM) du PRES Normandie Université, localisé sur le site de l'IUT d'Evreux. Ses recherches de Thèse ont pour but de visualiser et caractériser les appareils de sécrétion de type III des *Pseudomonas* pathogènes ou protecteurs de plantes.



Mr Daniel Sperandio est titulaire d'un doctorat en Microbiologie du PRES Normandie Université, obtenu en 2011. Il s'est spécialisé dans les études des facteurs de virulence et du pouvoir pathogène de la bactérie *Pseudomonas fluorescens*.



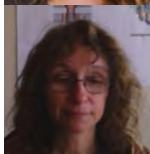
Mr Victorien Decoin est actuellement doctorant au Laboratoire de Microbiologie Signaux et Microenvironnement (EA 4312 LMSM) du PRES Normandie Université, localisé sur le site de l'IUT d'Evreux. Ses recherches de Thèse ont pour but de mieux comprendre la régulation génétique des systèmes de sécrétion de la bactérie *Pseudomonas fluorescens*.



Mme Nicole Orange est la directrice de la Plate-Forme de Technologie Normandie Sécurité Sanitaire de l'IUT d'Evreux. Cette plateforme labellisée est notamment vouée à la désinfection des matériaux biologiques par technologies innovantes et spécialisée dans le domaine de la qualité sanitaire des aliments.



Mme Sylvie Mazurier est Chargée de Recherches à l'UMR d'Agroécologie de l'INRA de Dijon. Ces travaux concernent notamment les systèmes de sécrétion de type III des bactéries associées aux plantes.



Mme Annabelle Merieau est Maître de Conférences au Laboratoire de Microbiologie Signaux et Microenvironnement (EA 4312 LMSM) du PRES Normandie Université, localisé sur le site de l'IUT d'Evreux. Ses travaux concernent notamment les systèmes de sécrétion des bactéries à Gram négatif et leur régulation, ainsi que l'épigénèse.



Mme Maïté Viché-Gibouin est Maître de Conférences au laboratoire de Glycobiologie et Matrice Extracellulaire Végétale (EA 4358 GlycoMEV) de l'université de Rouen (PRES Normandie Université). Ses travaux concernent notamment les cellules bordantes racinaires, les mécanismes de défense des plantes et leurs interactions avec les bactéries de la rhizosphère.



Mr Xavier Latour est Maître de Conférences au Laboratoire de Microbiologie Signaux et Microenvironnement (EA 4312 LMSM) du PRES Normandie Université, localisé sur le site de l'IUT d'Evreux. Ses travaux concernent notamment l'étude des interactions plante-bactéries et le développement de nouvelles méthodes de lutte biologique.

Conception d'une plateforme pluridisciplinaire ouverte et évolutive pour l'évaluation des technologies d'aide au maintien à domicile

Eric Campo*, Xavier Daran*, Adrien Van Den Bossche******

** IUT Toulouse 2 Blagnac – Université de Toulouse
1 place Georges Brassens, 31703 Blagnac*

*** CNRS, LAAS, 7 avenue du colonel Roche, F-31400 Toulouse*

**** CNRS, IRIT, 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse*

eric.campo@univ-tlse2.fr, xavier.daran@univ-tlse2.fr, vandenbo@univ-tlse2.fr

Sections de rattachement : 61, 63

Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ. Le papier présente la réalisation d'une plateforme expérimentale innovante permettant d'offrir un environnement d'évaluation des technologies pour l'aide au maintien à domicile de personnes fragiles (personnes âgées, handicapées ou souffrant de maladies chroniques). Elle se concrétise sous la forme d'un appartement intelligent instrumenté et de matériels interconnectés au travers d'une infrastructure de communication basée sur le standard KNX. Cette plateforme d'expérimentation est le fruit d'un partenariat étroit entre les acteurs de la recherche, de la formation et des acteurs économiques. Ce projet est pluridisciplinaire puisqu'il associe à la fois la dimension technique et la dimension psychosociologique au service de l'utilisateur.

MOTS-CLÉS : surveillance multi capteurs, maintien à domicile, réseaux de capteurs, approche psycho-humaine, interaction usager-système

1. Introduction

La question du maintien à domicile renvoie à une problématique actuelle, celle du vieillissement et de la prise en charge de la dépendance [1]. Elle se justifie autant par une nécessité sociétale que par des aspirations individuelles ou la recherche d'économies dans les dépenses de santé et de protection sociale. Cette problématique s'applique en particulier au cas du suivi des personnes fragiles en perte d'autonomie [2]. Le retour à domicile, par exemple, nécessite une « organisation » du domicile du patient tirant bénéfice des avancées technologiques et domotiques permettant un suivi médical, social et psychologique adapté et respectueux de la vie privée [3]. Un certain nombre de questions se posent alors : comment recueillir des données ambiantes permettant une bonne connaissance des événements, des comportements et attitudes qui caractérisent le fonctionnement des personnes fragiles (âgées, handicapées, convalescentes) dans leur environnement de vie ordinaire ? Comment coupler et synchroniser l'ensemble de ces mesures avec une description fine des comportements pour en retirer toute la signification ? Comment également intégrer d'autres paramètres pertinents comme le statut cognitif et perceptif, l'état de santé, les caractéristiques de l'environnement familial et social, celles du logement,... ?

Ce sont toutes ces questions qu'il est nécessaire de traiter pour assurer efficacement un accompagnement au maintien à domicile. Pour cela, un lieu adapté d'expérimentation associant tous les principaux acteurs semble incontournable.

2. Une association multi-acteurs

Les compétences en sciences techniques présentes sur le site de l'IUT de Blagnac, au travers de ses départements de formation et de ses personnels enseignants et enseignants-chercheurs mais également des partenariats industriels construits depuis de nombreuses années, ont permis de concrétiser un projet original. Associé aux compétences en sciences humaines et sociales existantes sur le site de l'Université de Toulouse 2-Le Mirail, un support d'expérimentation prenant la forme d'une maison intelligente au service de l'utilisateur prend tout son sens.

La Figure 1 illustre la mise en synergie des différents acteurs autour de la thématique de l'aide à l'autonomie et à la sécurisation permettant la dynamisation des actions de recherche transversales au sein de l'IUT de

Blagnac mais également la favorisation des collaborations avec des laboratoires qui participent à des travaux dans ce domaine [4].

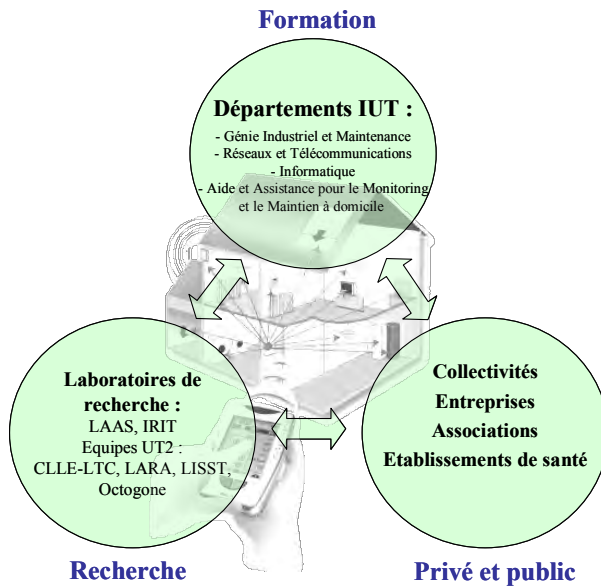


Figure 1 . Une synergie d'acteurs complémentaires

3. Plateforme expérimentale

La plateforme Maison Intelligente a pour objectif de proposer une infrastructure technique évolutive permettant d'une part l'adaptation automatique du logement au besoin de son occupant et le contrôle/commande des équipements par celui-ci, et d'autre part, la possibilité d'une mesure observationnelle permettant de connaître et de suivre le mode de vie d'un sujet dans son environnement réel (Figure 2).

Les champs d'application principaux visent :

- l'observation et la surveillance des activités pour le suivi du comportement, identification et mesures des indicateurs pertinents

(actimétrie, habitudes de vie, interaction avec l'environnement, agitation, poids,...),

- l'intra et extra-communication entre la personne et les outils disponibles (interaction sociale, interfaces de commande, retours de commandes,...),

- l'accessibilité, l'acceptabilité des dispositifs, l'appropriation et retour sur les usages,

- et l'automatisation des fonctions sécuritaires et gestion intelligente du confort.

Pour ce faire, dans la configuration standard, l'appartement est équipé d'une infrastructure interconnectée adaptable à une personne valide, à une personne âgée, à une personne handicapée. Pour cela, il est équipé de diverses sortes de capteurs (confort, sécurité domestique, gestion des accès, téléassistance,...) et d'aides techniques [4].

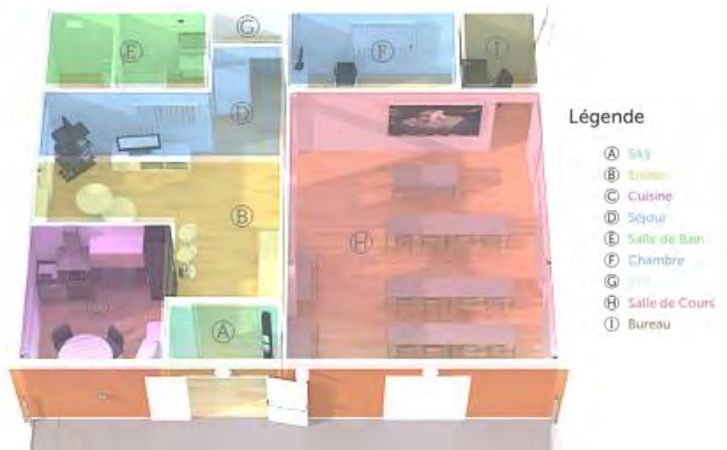


Figure 2 . *Maison intelligente de l'IUT Blagnac*

L'interopérabilité déployée autour d'un standard de communication va favoriser la communication entre tous les matériels et en accepter de nouveaux suivant le mode « plug and play ». Cette configuration doit ainsi pouvoir évoluer suivant le besoin de chaque acteur que ce soit pour de l'expérimentation, de la valorisation ou de la formation.

4. Une structure plurifonctionnelle

La maison possède une superficie de 80m² avec plusieurs pièces de vie et un local de 40m² destiné à la formation pédagogique, aux rencontres scientifiques et aux réunions avec les partenaires industriels (Figure 3). Elle est domotisée et aménagée pour recevoir un usager vivant seul, en perte d'autonomie ou handicapé [4]. Cette installation « intelligemment connectée » permet un confort de vie amélioré qui peut ainsi être géré selon des séquences pré-établies. Par exemple, une action effectuée sur un bouton de la télécommande ou un interrupteur peut enclencher à la fois l'ouverture d'une porte, l'éclairage d'une salle ou d'une zone et l'ouverture des volets. Une action sur un bouton « départ du domicile » peut correspondre à la mise en mode économique du chauffage, à la fermeture des occultants et à l'extinction de toutes les lumières... Chaque séquence programmée est personnalisée selon le profil et les souhaits de l'individu.



Figure 3 . *Maison intelligente domotisée*

La « maison intelligente » propose une représentation assez complète de ce qui est proposé aujourd'hui en termes de solutions technologiques pour répondre à la sécurité domestique, au confort, à la communication et à l'assistance pour la santé :

- des capteurs pour la mesure de paramètres ambiants,
- des capteurs pour la sécurité domestique (gaz, fumée, fuite d'eau),

- des dispositifs d'assistance (pilulier électronique pour l'aide à la prise de médicaments, éclairage automatique, ouverture/fermeture automatisée...),
- des dispositifs médicaux (tensiomètre et balance de pesée sans fil, capteurs physiologiques...),
- des dispositifs de suivi indoor (chute, malaise, perte de verticalité) ou outdoor (géolocalisation),
- des dispositifs de sécurité et de contrôle-commande à distance,
- des mobiliers motorisés adaptables en hauteur,
- des aides techniques (lit télécommandé, fauteuil roulant, soulève personne...) pour personnes handicapées.

Une gestion intelligente permet d'exécuter les commandes liées à des scénarios prédéterminés et modifiables. En outre, les équipements deviennent « interconnectés » et peuvent tout aussi facilement changer de fonction. Un affichage ergonomique informe de l'état des occupants, de la température, d'une détection de présence... dans le but de fournir à l'occupant une assistance ponctuelle. Une des difficultés majeures inhérentes à ce type d'assistance est la reconnaissance des activités de la vie quotidienne réalisées par l'individu à l'intérieur de son habitat, qui sont déterminées par les actions effectuées par celui-ci. Cette problématique constitue une thématique clé du domaine de l'assistance car le soutien technologique pour le maintien à domicile ne peut se faire que si le système arrive à interpréter correctement le comportement du sujet et à détecter ses erreurs. Certains outils que nous mettons en oeuvre reposent sur le suivi spatio-temporel de l'individu, sur la mesure de ses interactions avec les équipements de son habitat, sur la mesure de paramètres physiologiques et sur l'association de ces différentes possibilités.

5. Les besoins d'interconnectivité

L'hétérogénéité des données provenant de sources différentes rend la compréhension de la situation souvent difficile et parfois ambiguë. Ceci est d'autant plus vrai lorsque ces données ne communiquent pas en utilisant le même langage. L'interopérabilité entre les systèmes et équipements au sein d'un habitat doit pouvoir conduire à traiter de manière cohérente les informations échangées [5]. Pour réaliser l'interopérabilité entre des systèmes utilisant des ontologies différentes, nous avons choisi de faire communiquer tous les éléments et systèmes au travers d'un bus commun de communication filaire KNX. Ce bus est né il y a une vingtaine d'années sur les fondements de trois autres systèmes

qui étaient EIB, EHS et BatiBUS. En réalité, KNX reprend l'essentiel d'EIB et lui rajoute des fonctionnalités, c'est pourquoi la plupart des produits EIB restent compatibles avec KNX. KNX est une association de fabricants (Konnex) qui est en charge de la rédaction du standard, de la qualification des produits et de l'édition du logiciel unique de programmation : ETS. KNX a été normalisé aux niveaux européen, américain, chinois et même international par l'ISO. C'est d'ailleurs à ce jour le seul système ouvert à être normalisé au niveau mondial (ISO/IEC 14543-3).

Au sein de la maison intelligente, nous avons ainsi interconnecté sur le réseau KNX des éléments natifs KNX, des solutions propriétaires et des équipements que nous avons adaptés pour obtenir leur état de sortie (Figure 4). Une interface IP/KNX permet d'interagir avec la maison, à distance, et ce, dans les deux directions (remontée d'informations, action sur la maison). Cette infrastructure nous permet d'avoir un logement évolutif et de créer une vraie gestion intelligente des conditions de vie.

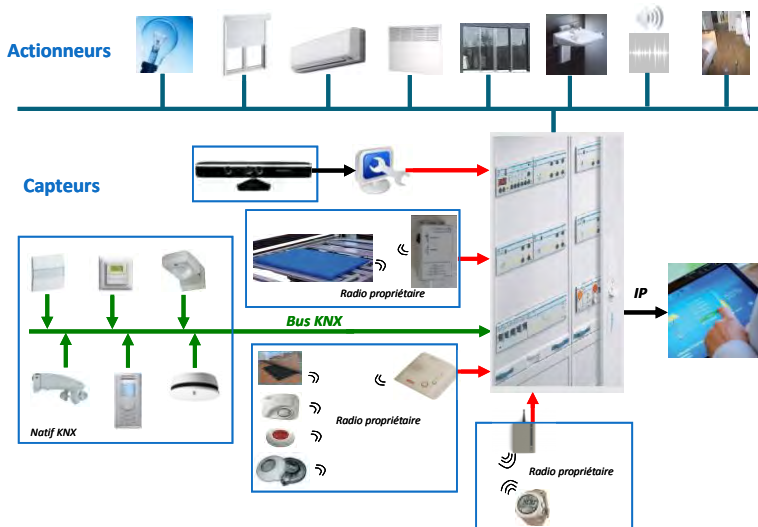


Figure 4 . *Infrastructure ouverte et évolutive basée sur le bus de communication KNX*

6. Conclusion

Cette plate-forme technologique, à l'image des « living lab », vise à rassembler dans un même lieu les compétences, les expertises, les synergies propres à faire évoluer conjointement et de façon dynamique, une problématique sensible, critique et jusqu'alors mal connue, dans un contexte unique offrant un degré maximal de réactivité en terme de veille technologique, d'expérimentation et de formation. Elle doit permettre de développer de nouvelles réponses à l'accompagnement du vieillissement des populations et par extension à la dépendance.

La maison intelligente de Blagnac est aujourd'hui opérationnelle et fonctionnelle. Elle est un outil à destination des acteurs de la recherche, de la formation et des entreprises. En particulier, elle est un outil de formation aux étudiants des différents départements de l'IUT et de son université de rattachement dans le domaine des SHS (Travaux pratiques, source de sujets de projets tuteurés, stages). Des scénarios sont en cours de définition pour évaluer différentes solutions pour le maintien à domicile impliquant à la fois les personnes (les usagers), les aidants et les soignants avec une approche prenant en compte conjointement les dimensions techniques et humaines. Plusieurs projets de recherche ont été initiés ou sont en cours de montage (PEPS CNRS, ANR, industriel...) pour concevoir et exploiter au mieux les fonctionnalités de la plateforme et permettre des avancées significatives de solutions d'aide au maintien à domicile. La maison intelligente de Blagnac est site de tests et d'évaluation du réseau PlatinnES du Centre e-Santé et a été labellisée par la Maison des Sciences de l'Homme et de la Société de Toulouse.

Remerciements. Les auteurs remercient l'ensemble des partenaires institutionnels et industriels, en particulier la société DomoCenter pour sa collaboration dans la définition et l'intégration des dispositifs domotiques, ainsi que la mairie de Blagnac, principal financeur du projet.

Bibliographie

[1] Boulmier M. « L'adaptation de l'habitat à l'évolution démographique : un chantier d'avenir », Rapport au secrétaire d'Etat au logement et à l'urbanisme, Paris : La Documentation Française, 2009.

[2] Boulmier M. « Bien vieillir à domicile : enjeux de l'habitat, enjeux de territoires », Rapport au secrétaire d'Etat au logement et à l'urbanisme, Paris : La

Documentation Française Xxx C., Interfaces homme-machine, Paris, Editions Hermès, 2010.

[3] Campo E., Estève D., Chan M. « Conception d'un habitat adapté pour l'aide à l'autonomie des personnes âgées », Les Cahiers de l'Année Gériatrique, vol. 4, 2012, p. 356-363.

[4] Campo E., Daran X., Redon L. « Une maison intelligente au carrefour des sciences technologiques et des sciences humaines », 2^{ème} Conférence internationale sur l'accessibilité et les systèmes de suppléance aux personnes en situation de handicap (ASSISTH 2011), Paris, 2011, p. 33-42.

[5] Association KNX France, <http://www.konnex.fr/>

Biographies



Eric Campo est Professeur à l'Université de Toulouse II – IUT Blagnac. Il enseigne l'électronique, l'électricité et les capteurs dans le département Génie Industriel et Maintenance dont il est le responsable depuis 2009. Docteur en Electronique de l'INSA de Toulouse en 1993, il mène ses recherches, au LAAS-CNRS dans la thématique des systèmes et microsystèmes multicapteurs communicants sans fil. Son domaine d'application est essentiellement celui de l'habitat intelligent dans lequel il a coordonné et participé à de nombreux projets pluridisciplinaires dédiés notamment à la surveillance et au maintien à domicile des personnes âgées. Il participe activement à divers groupes de travail en France autour du concept de maison intelligente et des technologies pour la santé avec en particulier la création de la plateforme « Maison Intelligente » de l'IUT de Blagnac. Il est membre du comité de direction du GdR Stic-Santé (responsable du thème "Capteurs, Vêtements, Habitats Intelligents pour la santé") et expert auprès du programme ANR-TecSan. Il est senior member IEEE et membre de l'ISG (International Society of Gerontechnology).



Adrien van den Bossche est Maître de Conférences à l'Université de Toulouse II – IUT de Blagnac. Il enseigne les réseaux, l'informatique industrielle et l'électronique numérique dans les départements Génie Industriel et Maintenance, Aide et Assistance pour le Monitoring et le Maintien à domicile et Réseaux et Télécoms. Docteur en Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal de

l'Université de Toulouse II – Le Mirail, LATTIS EA4155, il rejoint en 2011 l'équipe Ingénierie Réseaux et Télécommunications (IRT) de l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT). Ses recherches sont centrées sur les protocoles de communication pour les réseaux sans fil courtes portées et, plus précisément, la qualité de service dans le contrôle d'accès au médium, les contraintes énergétiques induites par les protocoles de communication et, plus récemment, la localisation des nœuds mobiles communicants par les méthodes *range-based*. Les applications visées par ses travaux concernent les réseaux pour l'aide et la surveillance de patients à domicile et les réseaux industriels (supervision, contrôle/commande).



Xavier Daran est Professeur Agrégé de Mécanique à l'Université Toulouse II – IUT de Blagnac depuis septembre 1993. Il enseigne la mécanique, les méthodes de maintenance, l'aménagement de l'habitat et la gestion de projet. Directeur-Adjoint de l'IUT de 1995 à 2000, il s'implique dans l'ingénierie pédagogique concrétisée par la mise en œuvre de nouvelles formations et la création de licences professionnelles. Actuellement chargé des relations avec les acteurs économiques, il a participé à la création du département 2A2M (Aide et Assistance pour le Monitoring et le Maintien à domicile) ainsi qu'à la conception et au fonctionnement de la plateforme « Maison Intelligente ». Elu au Conseil Scientifique de l'Université Toulouse II – Le Mirail depuis 2011, il siège à la Commission Valorisation de la Recherche afin de développer les liens entre la recherche universitaire et les milieux socio-économiques.

Thérapies innovantes dans le cancer broncho-pulmonaire

Virginie Hervé, Pascale Reverdiau.

- IUT de Tours - Université François Rabelais, 29 rue du Pont-Volant
37082 Tours Cedex - Centre d'Etude des Pathologies respiratoires
INSERM U1100 / EA 6305, Université François Rabelais, 10 Bd
Tonnellé 37044 Tours Cedex

virginie.herve-grepinet@univ-tours.fr ; reverdiau@med.univ-tours.fr

Sections de rattachement : 65 Biologie cellulaire

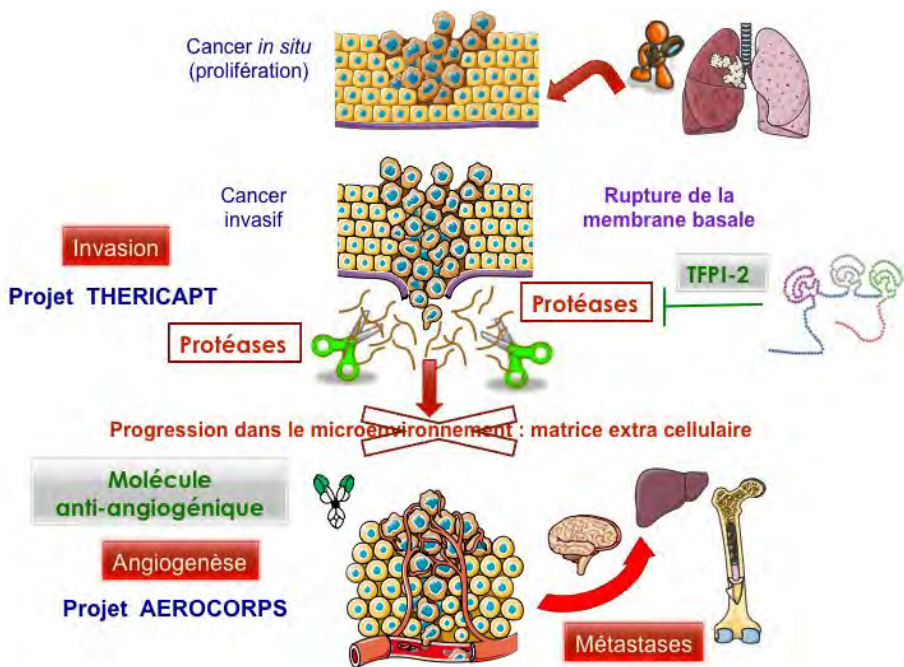
Secteur : Secondaire

La recherche de thérapies ciblées est un enjeu majeur en cancérologie et notamment pour le traitement du cancer broncho-pulmonaire, première cause de mortalité par cancer chez l'homme et en constante progression chez la femme. Ce type de cancer est redoutable en raison de sa progression rapide et de l'apparition fréquente de métastases, le plus souvent responsables du décès du malade. L'objectif actuel de la recherche sur le cancer est donc de développer des thérapies ciblant différentes étapes de la cancérogenèse et notamment les fonctions cellulaires impliquées dans la progression tumorale. Ces traitements, plus efficaces et moins toxiques, permettraient d'améliorer la survie et la qualité de vie des patients. Il existe cependant de nombreuses contraintes associées à cette recherche de nouvelles molécules ou biomédicaments qui doivent être innovants, de par leur cible, leur mécanisme d'action, leur bio-distribution et leur voie d'administration.

MOTS-CLÉS : Cancer broncho-pulmonaire, thérapies ciblées, biomédicaments, angiogenèse, VEGF, prolifération, apoptose, invasion, TFPI-2.

Introduction

Les cancers du poumon sont la cause la plus fréquente de mortalité par cancer dans le monde (Siegel *et al.*, 2013) et particulièrement en France avec environ 27000 décès par an (Institut de Veille Sanitaire, 02/08). Chez l'homme, le cancer du poumon est la 1^{ère} cause de mortalité par cancer et il devient préoccupant également chez la femme car en constante augmentation. Le cancer broncho-pulmonaire, dont le tabac est la cause majeure, est redoutable en raison de sa progression rapide et de l'apparition fréquente de métastases, le plus souvent responsables du décès. Afin d'améliorer l'espérance de vie des patients, l'enjeu de nombreux travaux de recherche est donc de développer des thérapies ciblées, plus efficaces et moins toxiques, permettant d'améliorer la survie et la qualité de vie des patients. Pour répondre à ces objectifs, la pluridisciplinarité au sein des équipes de recherche est essentielle et implique à la fois des biologistes (évaluation de l'efficacité, de la toxicité, de la distribution), des pharmaciens (production de nouvelles molécules), des médecins (connaissances et données médicales, prélèvements), des physiciens (développement de nouveaux procédés comme des nébulisateurs) et des chimistes (modifications des molécules pour augmenter leur efficacité). Des partenariats entre structures de recherche institutionnelles et des PME/PMI sont également nécessaires. Ainsi, le projet AEROCORPS (ARAIR – CGO) vise à cibler l'une des étapes clef du développement tumoral, l'angiogenèse et le second programme, THERICAPT (Région Centre – Ligue contre le Cancer) cible l'invasion cellulaire, indispensable à la tumeur pour constituer des métastases (figure 1).



Au cours du processus complexe qu'est la cancérogenèse, la cellule cancéreuse accumule progressivement de multiples altérations génétiques affectant de nombreuses fonctions cellulaires : prolifération, migration/invasion, différenciation et mort cellulaire ou apoptose. Ce processus est dynamique et, à l'image de la théorie de l'évolution des espèces selon Darwin, favorise l'acquisition par la cellule d'un formidable avantage en termes de prolifération et de survie (Axelrod *et al.*, 2006). Cette plasticité cellulaire favorise l'hétérogénéité de la tumeur, également renforcée par les interactions établies entre les cellules tumorales et leur microenvironnement.

Ciblage de l'angiogenèse tumorale

Dans le cadre du projet AEROCORPS (ARAIR – CGO), l'une de ces cibles est l'angiogenèse tumorale. En effet, la croissance tumorale est associée à l'apparition de nouveaux vaisseaux sanguins désorganisés, destinés à répondre aux besoins de la tumeur (Hanahan & Folkman, 1996). Contrairement à ce qui est observé au cours des phénomènes

physiologiques, l'angiogenèse tumorale est caractérisée par une organisation anarchique de la vascularisation ainsi qu'une perméabilité vasculaire accrue. L'étape la plus importante du phénomène d'angiogenèse tumorale est le « switch angiogénique » où l'équilibre entre activation et inhibition de facteurs moléculaires pro- et anti-angiogéniques est rompu au profit d'une activation des facteurs pro-angiogéniques et une inhibition des facteurs anti-angiogéniques.

Le VEGF (*Vascular Endothelial Growth Factor*) est un facteur pro-angiogénique qui agit en se fixant sur ses récepteurs spécifiques, exprimés par les cellules endothéliales, vasculaires, lymphatiques et les précurseurs myéloïdes. Grâce à ses récepteurs, il permet la prolifération, l'invasion, la migration, la survie et l'activation de ces cellules ainsi que l'augmentation de la perméabilité des vaisseaux. La neutralisation du VEGF a montré son efficacité dans certains types de cancers en inhibant la croissance tumorale. Par exemple, sur deux études de phase III, réalisées en Europe et aux Etats-Unis, dans l'indication du traitement des patients développant un cancer du poumon métastatique en association à une chimiothérapie par un doublet à base de platine, un bénéfice de survie a été démontré (Sandler *et al.*, 2006). Cependant, leur indication est néanmoins restreinte à certains types de cancers uniquement, du fait d'une sur-toxicité dans ces cas particuliers. Ainsi, dans le cadre du cancer broncho-pulmonaire, nous avons choisi d'utiliser une nouvelle voie d'administration de la molécule : l'aérosol.

Nos résultats montrent que les souris porteuses de tumeurs, présentent une bonne tolérance à l'administration par aérosol de la molécule thérapeutique (monodose ou doses répétées) et qu'une réduction significative du nombre de tumeurs est constatée, après injection par aérosol d'une monodose d'anticorps, en comparaison avec une injection intraveineuse et n'entraînant pas de toxicité (figure 2). En conclusion, comparée à une injection intraveineuse, cette même molécule, administrée par aérosol, montre une meilleure efficacité anticancéreuse avec une dose plus faible et aucun effet secondaire, ouvrant la voie à de nouveaux protocoles thérapeutiques.

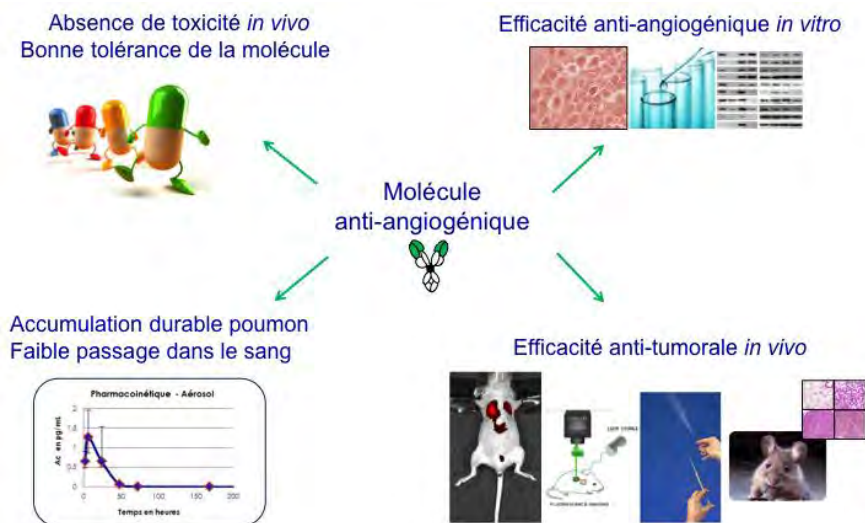


Figure 2. Effets de l'administration d'une molécule anti-angiogénique.

Ciblage de l'invasion et de l'apoptose

Lors du développement d'un cancer pulmonaire, les cellules épithéliales transformées sous l'impact des molécules cancérigènes, notamment contenues dans le tabac, prolifèrent, c'est un cancer *in situ*. Dans un 2nd temps, pour que la tumeur progresse, les cellules vont devoir franchir la barrière que constitue la membrane basale puis envahir le tissu pulmonaire en dégradant la matrice extra-cellulaire, c'est un cancer invasif. Pour dégrader ces barrières, les cellules tumorales produisent des enzymes : les protéases qui vont leur permettre de cliver les protéines de ces matrices (Chand et al., 2004 ; Gaud et al., 2011). Le projet THERICAPT (Région Centre – Comités départementaux de la Ligue contre le Cancer) se focalise sur les mécanismes d'action d'un potentiel bio-médicament le TFPI-2 (*Tissue Factor Pathway Inhibitor 2*), maintenant considéré comme un suppresseur de tumeur et qui inhibe la progression tumorale.

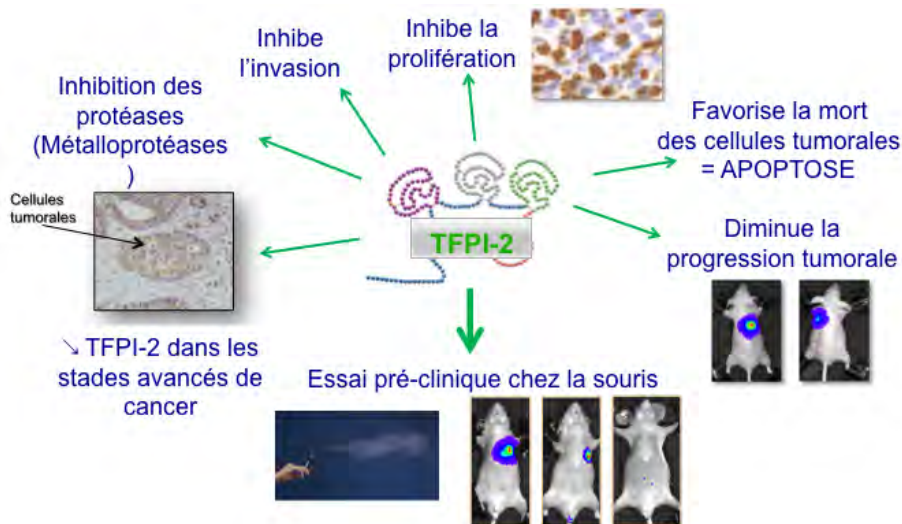


Figure 3. Rôle d'un inhibiteur de protéases à sérine, le TFPI-2 dans la progression tumorale

Nous avons montré que le TFPI-2 pouvait avoir un impact sur les fonctions des cellules tumorales pulmonaires en favorisant la mort cellulaire par apoptose et en inhibant la prolifération, la migration et l'invasion cellulaire (Figure 3). De plus, cet inhibiteur est souvent inactivé, notamment par méthylation de son promoteur, réduisant ainsi son expression dans les stades les plus avancés de cancer. Le TFPI-2, en tant qu'inhibiteur de protéases, limite aussi la génération de métalloprotéases actives et par conséquent réduit l'invasion et la dissémination des cellules tumorales dans le microenvironnement. L'ensemble de ces résultats nous conduit maintenant à évaluer, en préclinique chez la souris, la pertinence de l'administration du TFPI-2 par voie inhalée et d'évaluer son efficacité sur des tumeurs pulmonaires constituées. La nébulisation permettrait de mieux cibler le poumon grâce à une administration locale et, par conséquent, potentiellement plus efficace.

Modèles expérimentaux et imagerie

L'étude des mécanismes d'action de ces molécules thérapeutiques suppose le développement de modèles animaux présentant des tumeurs broncho-pulmonaires, tout en respectant les règles éthiques. En effet, le

nombre de souris impliquées dans ces études peut être limité puisque les techniques d'imagerie employées sont non invasives (microscanner X et bioluminescence) et permettent de suivre les effets des molécules étudiées en temps réel pendant plusieurs semaines chez les mêmes animaux. Ces outils méthodologiques ont été adaptés par les biophysiciens du Centre d'Imagerie du Petit Animal (CIPA) d'Orléans. A titre d'exemple, dans le cadre du projet THERICAPT, nous avons développé un modèle orthotopique de cancer pulmonaire en implantant, chez la souris, des cellules exprimant la luciférase. La progression de la tumeur peut alors être visualisée grâce à la lumière émise par les cellules (comme la luciole). C'est ainsi que l'intensité de la lumière émise est plus forte lorsque les cellules ne produisent pas le TFPI-2 (les cellules prolifèrent). En revanche quand les cellules produisent l'inhibiteur, la lumière est plus faible car les tumeurs sont plus petites.

Les études de bio-distribution et les analyses histologiques des tumeurs prélevées chez les animaux lors des autopsies ont été réalisées en partenariat avec deux entreprises régionales, le CERB et NovaXia ou en association avec l'hôpital Tenon de Paris.

Aérosolthérapie

La voie d'administration des molécules, comme évoqué précédemment, est un point crucial dans le traitement. L'aérosolthérapie est une modalité de traitement consistant à faire inhaler au patient un médicament, solide ou liquide, mis en suspension dans un milieu gazeux sous forme de fines particules (aérosol). Elle est utilisée en routine hospitalière pour administrer directement vers l'organe cible diverses molécules, comme des bronchodilatateurs, des corticostéroïdes ou des antibiotiques, chez des patients atteints de pathologies pulmonaires inflammatoires et infectieuses (asthme, BPCO, ...). L'avantage de l'aérosolthérapie anti-tumorale est un ciblage direct du médicament au tractus pulmonaire, évitant un passage hépatique et/ou rénal avant qu'il n'atteigne sa cible et limitant son dépôt dans d'autres organes. Ainsi, la concentration et la période d'exposition du médicament au niveau du site tumoral pulmonaire seraient majorées alors que la dose diffusant au reste de l'organisme serait limitée ce qui potentiellement réduit la toxicité systémique. Même si les résultats des études précliniques et des essais cliniques menés avec des agents chimiothérapeutiques aérosolisés sont prometteurs en termes de tolérance et d'efficacité (Gagnadoux *et al.*, 2008), l'aérosolthérapie anti-cancéreuse n'est pas exploitée en clinique. Plusieurs explications peuvent être avancées : 1) sa mise en oeuvre est

complexe car l'aérosolthérapie d'agents cytotoxiques nécessitent des procédures et des équipements spécifiques pour éviter la dissémination de l'aérosol, assurer la sécurité du personnel hospitalier et contrôler le dépôt pulmonaire; 2) malgré l'amélioration des inhalateurs, la quantité déposée n'est pas toujours reproductible car les paramètres respiratoires du patient et l'obstruction des voies aériennes (par le carcinome) influencent le dépôt pulmonaire ; 3) la formulation commerciale (excipient) et la nature physico-chimique de l'agent chimiothérapeutique ne sont pas forcément adaptés pour cette modalité d'administration pouvant potentiellement induire une toxicité locale.

Les résultats des travaux menés au laboratoire montrent que des molécules thérapeutiques peuvent résister aux contraintes physiques de l'aérosolisation (Maillet *et al.*, 2008) et s'accumuler durablement dans le poumon, pour conduire à une réponse anti-tumorale (Maillet A *et al.*, 2011). Ainsi, l'aérosolthérapie semble particulièrement prometteuse pour le ciblage de zones anatomiques précises. En effet, elle permet en théorie une concentration des molécules thérapeutiques dans le tractus pulmonaire, d'où potentiellement une meilleure efficacité, et limite leur passage systémique et donc les effets secondaires qui y sont associés. Cependant, les dispositifs actuels de génération d'aérosols ont des performances limitées, ne répondant pas toujours aux besoins spécifiques de nouveaux médicaments. Nos projets font donc aussi appel à des biophysiciens appartenant à l'équipe EA 6305 / entreprise Aerodrug-DTF, experts dans les domaines de l'aérosolthérapie et de la nébulisation de biomédicaments.

L'aérosolthérapie des nouveaux bio-médicaments anti-cancéreux pourrait ainsi ouvrir de nouvelles perspectives chez les patients atteints d'un cancer broncho-pulmonaire, pathologie pour laquelle le besoin de stratégies thérapeutiques innovantes est crucial.

Bibliographie

Axelrod R., Axelrod D.E., Pienta K.J. Evolution of cooperation among tumor cells. *PNAS*, 2006, 103(36):13474–9.

Chand H.S., Schmidt A.E., Bajaj S.P., Kisiel W. Structure-function analysis of the reactive site in the first Kunitz-type domain of human tissue factor pathway inhibitor-2. *J. Biol. Chem.*, 2004, 279(17):17500-7.

Gagnadoux F., Hureauux J., Vecellio L., Urban T., Le Pape A., Valo I., Montharu J., Leblond V., Boisdron-Celle M., Lerondel S., Majoral C., Diot P., Racineux J.L., Lemarie E. *J Aerosol Med.*, 2008, 21(1):61-70.

Gaud G., Iochmann S., Guillon-Munos A., Brillet B., Petiot S., Seigneuret F., Touzé A., Heuze-Vourc'h N., Courty Y., Lerondel S., Gruel Y. and Reverdiau P. TFPI-2 silencing

increases tumour progression and promotes metalloproteinase 1 and 3 induction through tumour-stromal cell interactions. *J. Cell. Mol. Med.*, 2011, 15(2):196-208.

Hanahan D., Folkman J. Patterns and emerging mechanisms of the angiogenic switch during tumorigenesis. *Cell*, 1996, 86(3):353-64.

Maillet A., Congy-Jolivet N., Le Guellec S., Vecellio L., Hamard S., Courty Y., Courtois A., Gauthier F., Diot P., Thibault G., Lemarié E., Heuzé-Vourc'h N. Aerodynamical, immunological and pharmacological properties of the anticancer antibody cetuximab following nebulization. *Pharm Res.* 2008, 25(6):1318-26.

Maillet A., Guilleminault L., Lemarié E., Lerondel S., Azzopardi N., Montharu J., Congy-Jolivet N., Reverdiau P., Legrain B., Parent C., Douvin D.H., Hureauux J., Courty Y., De Monte M., Diot P., Paintaud G., Le Pape A., Watier H., Heuzé-Vourc'h N. The Airways, a Novel Route for Delivering Monoclonal Antibodies to Treat Lung Tumors. *Pharm Res.*, 2011, 28(9):2147-56.

Sandler A., Gray R., Perry M.C., Brahmer J., Schiller J.H., Dowlati A. Paclitaxel-carboplatin alone or with bevacizumab for non-small-cell lung cancer. *N Engl J Med.*, 2006, 355(24):2542-50.

Siegel R., Naishadham D., Jemal A. Cancer statistics, 2013. *CA Cancer J Clin.*, 2013, 63(1):11-30



Virginie HERVE, Maître de Conférences,
IUT – Université François Rabelais / CEPR, Inserm U1100 Tours.
Thèse de Doctorat en 2004.

Domaines de compétences : Biologie cellulaire, Immunologie, Physiologie animale.

Mots-clefs : Poumon, Infection, Inflammation, Immunité Innée, Protéases, Anticorps, Peptides antimicrobiens.

12 publications, 16 posters et 8 communications orales.



Pascale REVERDIAU, Professeur des Universités,
IUT – Université François Rabelais / CEPR, EA 6305 Tours.

Chef du département Génie Biologique IUT de Tours.

HDR en 1998, thèse de Doctorat en 1986.

Domaines de compétences : Biologie cellulaire, Hématologie.

Mots-clefs : Cancer broncho-pulmonaire, Protéases, inhibiteurs de protéases.

38 publications, 3 chapitres d'ouvrage, 40 posters et 14 communications orales.

De la psychologie au marketing : Doit-on adapter les échelles des psychologues au comportement du client en magasin ?

Le cas des émotions

Patrice Cottet*, Marie-Christine Lichtlé et Véronique Plichon*****

**IUT de Troyes*

Département Techniques de Commercialisation

REGARDS

9 rue de Québec, BP 396 - 10026 Troyes Cedex

***Université de Montpellier 1*

MRM

UFR Administration Economique et Sociale

Avenue Raymond Dugrand - 34960 Montpellier cedex 2

**** IUT de Tours*

Département Techniques de Commercialisation

VALLOREM/CRESCEM

29 rue du Pont Volant- 37082 Tours Cedex 2

veronique.plichon@univ-tours.fr

Sections de rattachement : 6

Secteur : Tertiaire

RÉSUMÉ. La recherche en marketing est pluridisciplinaire et fait appel à de nombreuses disciplines : psychologie, sociologie, économie etc. L'utilisation d'instruments de mesure provenant d'autres champs de recherche est donc pratique courante. Les chercheurs les appliquent sans prendre en compte les spécificités de notre contexte de consommation. Très peu de travaux en marketing ont réfléchi au bien fondé de cette transversalité. Ce travail illustre les limites de telles pratiques et souligne la nécessité d'adapter nos outils de mesure dans un cas particulier : la mesure des émotions en distribution.

MOTS-CLÉS : émotion, mesure, marketing, transversalité

1. Introduction

Face à un consommateur de moins en moins fidèle et à une concurrence accrue, certains distributeurs ont choisi de travailler sur l'atmosphère de leur magasin, en incitant les chalands à vivre des moments d'émotions. Les magasins Disney Store, les boulangeries traditionnelles Paul, Nature et Découvertes, Niketown, Abercrombie & Fitch en sont des exemples. L'objectif est de créer une expérience unique, positive et affective qui améliore la satisfaction et la fidélité des clients. En ré-enchantant le point de vente, les distributeurs cherchent, par différents moyens, à susciter des émotions positives chez leurs clients. Par la gestion de l'expérience du client, l'enseigne va, en effet, tenter de faire du passage en magasin un temps de plaisir. Les réactions affectives influencent en effet le comportement du consommateur (le choix du magasin, le temps passé en magasin, l'exploration du point de vente, la recherche d'informations, la probabilité de dépenser plus d'argent que prévu, la communication avec les employés ou les autres clients...), l'intention comportementale (l'intention de revenir, l'intention d'achat) et la perception de la visite (la perception du temps passé, la valeur perçue du magasin, la satisfaction).

D'un point de vue académique, l'étude des états affectifs en marketing s'est fondée sur les recherches en psychologie anglo-saxonne. Les échelles de mesure verbales de Plutchik (1980), d'Izard (1977) ou le PAD de Mehrabian et Russel (1974) ont notamment été très utilisées. Mais l'inconvénient des théories en psychologie est qu'elles ne prennent pas en

compte les particularités des états affectifs ressentis dans un contexte marketing (Richins, 1997 ; Huang, 2001) et dans un cadre francophone. L'utilisation des échelles de mesure des états affectifs au contexte de distribution français montre des limites, des problèmes de validité ayant été soulevés.

Les questions que nous soulèverons dans ce travail de recherche seront les suivantes : **peut-on simplement transférer les échelles des psychologues à nos travaux de recherche en marketing en les répliquant et en les traduisant littéralement ? Comment mesurer les émotions dans un contexte marketing ? Nous nous interrogerons ainsi sur les difficultés que pose l'utilisation en sciences de gestion de travaux issus d'une autre discipline, en raison, notamment, de spécificités liées à leur contexte d'application.**

Pour répondre à ces questions nous présenterons dans un premier temps le concept d'états affectifs et nous synthétiserons l'impact des travaux des psychologues sur nos recherches en marketing. Puis, dans une seconde partie, nous nous interrogerons sur la capacité et le bien fondé des instruments actuels à mesurer les émotions en marketing, et plus particulièrement à l'intérieur d'un point de vente. Nous démontrerons ainsi que de nombreuses limites peuvent être soulignées. Enfin, dans une dernière partie, nous proposerons une échelle de mesure des émotions ressenties à l'intérieur d'un point de vente et adaptée à notre contexte marketing et culturel.

2 Les états affectifs

2.1 Définition

Les états affectifs (que nous appellerons aussi émotions) sont un concept imprécis et difficile à définir. Il existe, en effet, une confusion entre les termes « réactions affectives », « affect », « émotions », « humeur »... en raison de leur caractère polysémique. Face à cette incohérence, Derbaix et Pham (1989) proposent une typologie de l'affect en sept catégories : « l'émotion choc » (la plus affective des réactions), « le sentiment », « l'humeur », « le tempérament », « la préférence », « l'attitude »,

« l'appréciation » (la plus cognitive de ces réactions). Une synthèse a été proposée plus récemment par Derbaix et Gregory (2004) : « l'émotion doit s'appréhender comme un métaconcept recouvrant une conjonction de processus physiologiques, neurologiques, expressifs, sociaux et autres ». Holistique, un affect se manifeste de manière bipolaire (j'aime/j'aime pas). Ressentir des états affectifs est une expérience inévitable (sauf lésion du cerveau), souvent accompagnée de manifestations somatiques.

L'avancement des connaissances en psychologie des émotions s'est déroulé dans le cadre de grandes traditions de recherches. Différentes théories, aux paradigmes distincts, ont ainsi tenté de conceptualiser les états affectifs. On peut distinguer plusieurs grands groupes de théories : les théories biologiques, les théories sociales cognitives, les théories sur le self, les théories dynamiques et humanistes, les théories behavioristes (Kirouac, 1993). A celles-ci s'ajoute l'arrivée des neurosciences. Dans cette dernière approche, l'amygdale est l'élément central parmi les structures impliquées dans la gestion émotionnelle. Sa fonction essentielle est d'attribuer une signification affective aux stimuli sensoriels qui lui parviennent de l'environnement. Les études portant sur les lésions cérébrales ont démontré que les processus émotionnels sont notamment impliqués dans ceux présidant à la prise de décision (Damasio, 1994). Les émotions nous permettraient d'évaluer le caractère désirable ou non d'une décision. Elle donne donc une étiquette à une situation. On comprend ainsi immédiatement l'intérêt que peuvent en tirer les praticiens. Etre capable de provoquer certaines émotions, c'est pousser l'individu à avoir un comportement favorable à l'entreprise.

22 La structure des affects

En ce qui concerne la structure de ces affects, il existe deux courants de recherche correspondant à deux manières de se représenter les états affectifs :

- La première approche, appelée « **la perspective discrète** » considère que les émotions sont conceptualisées comme des catégories discrètes et phénoménologiquement distinctes. Le nombre d'émotions primaires varie de 7 à 15 environ (Izard, 1977 ; Plutchik, 1980, Tomkins, 1980 ; Ekman, 1982). En se mélangeant, elles forment, comme des couleurs primaires,

tous les affects qui peuvent exister. Pour Izard (1977), 10 émotions sont fondamentales (7 négatives, 2 positives et une neutre). Selon Plutchik (1980), 8 émotions primaires existent (4 négatives, 2 positives, 2 neutres). Seules 5 émotions de base sont communes aux divers auteurs. Ces émotions constituent le système motivationnel humain. Dispositions universelles et innées du cerveau, elles ont ainsi un rôle essentiel dans la survie des êtres humains, leur permettant de s'adapter à la situation. La structure de Plutchik a souvent été choisie pour analyser les émotions en publicité (Zeitlin et Westwood, 1986 ; Holbrook et Westwood, 1989 ; Havlena *et alii*, 1989). Dans un contexte de consommation, les résultats obtenus sont beaucoup plus mitigés et plaident pour le recours à une structure dimensionnelle (Havlena et Holbrook, 1986 ; Halvena *et alii*, 1989). En distribution, Halvena *et alii* (1989) conseillent ainsi de choisir une approche dimensionnelle, alors que pour une recherche en publicité, ils préconisent le schéma de Plutchik. Quelques chercheurs ont plus récemment mesuré les états affectifs selon l'approche discrète dans un environnement commercial (Dawson, Bloch et Ridgway, 1990 ; Menon et Dubé, 2000).

- La seconde approche, « **la perspective dimensionnelle** », suggère que pour mieux comprendre l'impact des affects, il est nécessaire de les réduire à un certain nombre de dimensions sous-jacentes. Le nombre de dimensions varie selon les auteurs. Deux dimensions émergent clairement dans les travaux : la dimension « évaluation » ou « plaisir/déplaisir » (l'échelle va de « désagréable » à « agréable ») et la dimension « activation », qui représente le degré de stimulation, pour lequel le continuum s'échelonne de « non stimulé » (ou « faible activation ») à « stimulé » (ou « forte activation »). Un des modèles les plus connus est celui de Mehrabian et Russell (1974). Dans le cadre de la psychologie environnementale, ces deux auteurs identifient trois dimensions sous-jacentes aux états affectifs. Toute réponse émotionnelle, qu'elle soit une émotion choc, un sentiment, une humeur ou un affect plus attitudinal, peut être représentée dans cet espace à trois dimensions indépendantes et bipolaires : le **plaisir** qui fait référence à un état positif et traduit le degré de bien être et de satisfaction d'une personne, l'**activation**, dimension physiologique caractérisant l'activité physique ou la vivacité mentale d'un organisme, qui comprend deux pôles extrêmes (le sommeil et la

surexcitation) et enfin la **dominance**, qui fait référence à la sensation de pouvoir, de contrôle ou d'influence versus un manque de pouvoir ou une incapacité à contrôler ou influencer une situation. Ces dimensions seraient nécessaires et suffisantes pour définir les réactions affectives (Holbrook et Batra, 1987).

3 Mesure-t-on correctement les états affectifs en marketing ?

31 Le recours aux mesures des psychologues

Selon Derbaix et Pham (1989), la mesure des émotions est extrêmement délicate et ne permet pas actuellement de mesurer les quatre composantes d'une émotion (leur intensité, leur direction, leur contenu et la conscience que l'individu en a). Il serait nécessaire, selon ces auteurs, de combiner trois techniques classiques de mesure, utilisées souvent séparément : des mesures de la composante neurophysiologique et biologique, des mesures de la composante expressive et des mesures de la composante expérientielle.¹

Parce que les changements physiologiques occupent une place importante dans l'expérience émotionnelle, les mesures du volume sanguin, du rythme cardiaque, de l'activité électrodermale ou la fréquence respiratoire sont couramment utilisées par les psychologues pour caractériser la valence et l'intensité de l'affect. Celles-ci sont rarement utilisées en marketing, car elles sont difficiles à mettre en œuvre dans nos domaines d'étude (appareillage coûteux et difficilement utilisable en magasin ; effet d'instrumentation élevé dans un environnement social). Quelques très rares exceptions peuvent être citées. Gröppel-Klein et Baun (2001) ont, par exemple, choisi une mesure de l'activité électrodermale pour évaluer l'activation ressentie dans un magasin, le principal avantage étant qu'elle intervient en même temps que la perception des stimuli. Selon ces auteurs, ce type d'instrument a plusieurs limites : le temps nécessaire pour atteindre un échantillon de taille suffisante est très important, certains consommateurs ne sont pas prêts à être connectés à des

¹ Pour une synthèse de ces différents instruments de mesures, voir l'article de Derbaix et Poncin (1998) ; ces auteurs analysent les avantages et inconvénients des principales modalités de mesure.

électrodes, les courbes que l'on obtient sont interprétées manuellement et surtout, ces instruments ne révèlent pas si les émotions ressenties sont positives ou négatives. Pourtant, il existe actuellement certains appareils mieux adaptés à nos contextes. Le « Galavactivator » (Picard et Scheirer, 2001) est un gant portable qui évalue le niveau de conductance et traduit les valeurs en une intensité lumineuse via une LED. Plus le gant est brillant, plus l'activation physiologique est élevée. D'autres instruments de mesure sont adaptés à l'étude des émotions sur Internet : la « Sentic Mouse » (Kirsch, 1997) ou la « Emotion Mouse » (Ark *et alii*, 1999). Cette dernière évalue quatre indices physiologiques (le rythme cardiaque, la température, l'AED et l'activité somatique) lors de 6 émotions (colère, dégoût, peur, joie, tristesse, surprise). Toutefois, ces émotions sont particulières (on les éprouve plus facilement en jouant sur le net qu'en allant sur un site marchand) et seules 2/3 des émotions sont correctement prédites.

Dans la lignée des travaux de Darwin (1872) ou d'Ekman (1982, 1994), des mesures de la composante expressive (voix, visage) permettent de déterminer quelques émotions de base. Cependant, Fridund (1997) a démontré qu'elles étaient modestement corrélées aux états affectifs. En publicité, Derbaix (1995) a souligné que leur apport était faible par rapport aux mesures verbales. De plus, dans un environnement commercial, les réponses faciales sont très facilement contrôlables.

Ainsi, en marketing, des mesures de l'expérience subjective sont presque toujours utilisées. A partir d'un questionnaire, il est possible d'identifier les affects ressentis à l'aide d'échelles verbales ou graphiques. On peut distinguer les instruments de mesures utilisés selon la perception que les psychologues ont de la structure d'un affect : certaines mesures considèrent les états affectifs comme des catégories (Plutchik, 1980, le DES I ou II d'Izard, 1977), d'autres comme un construit multidimensionnel (le PAD de Mehrabian et Russel, 1974). En France, l'échelle PAD (Plaisir, Activation, Dominance), la plus utilisée en marketing et, plus particulièrement, en distribution, pose souvent problème. Elle est parfois mal comprise et mal acceptée par les personnes interrogées (Auteurs 2004). Nombreux sont les chercheurs qui ne retrouvent pas la même structure, connaissent des difficultés sur au moins

une des dimensions (souvent activation ou dominance), rencontrent des problèmes de fiabilité ou de validité (Grillot, 1996 ; Lebrun, 1996 ; Dion, 1999 ; Plichon, 1999 ; Daucé, 2000 ; Lichtlé et Plichon, 2004 ; Lunardo, 2007).

32 Les limites des mesures de l'expérience subjective : la non prise en compte du contexte marketing

Comme nous l'avons vu, les théories en psychologie constituent le point de départ des travaux menés en marketing. La majorité des chercheurs répliquent les mesures des psychologues, comme si les instruments étaient universels. Or, plusieurs auteurs ont souligné l'absence de prise en compte des particularités des états affectifs ressentis dans un contexte marketing (Richins, 1997 ; Huang, 2001 ; auteur , 2004). Si quelques recherches en publicité ont essayé de réfléchir sur le sujet (Edell et Burke, 1987 ; Burke et Edell, 1989, Aaker *et alii*, 1988, Batra et Holbrook, 1990), peu de travaux ont eu lieu lors d'une expérience de consommation (Richins, 1997). Il semble pourtant que le consommateur éprouve dans un contexte de consommation, des affects de plus faible intensité (Derbaix et Pham, 1991, Huang, 2001). Leur contenu est variable selon le contexte (Huang, 2001).

Certaines échelles comportent des termes peu familiers et peu compréhensibles à un client de magasin pour expliquer les affects qu'il a pu ressentir. Il est rare de ressentir du dégoût, de la peur, de la honte voire de la colère dans un point de vente. Ce sont, hélas, ces termes qui sont utilisés dans les échelles catégorielles. Les échelles dimensionnelles ne sont pas mieux adaptées au contexte. Est-on souvent malheureux ou désespéré en faisant nos courses, termes présents dans le PAD ? Les termes « contrôlé », « dominé » ou « influencé » peuvent également sembler inadaptés.

Par ailleurs, certaines méthodes verbales avaient, dès le départ, leurs propres limites. En particulier, on peut s'interroger sur la pertinence d'un simple continuum opposant les affects positifs aux affects négatifs, car, dans un contexte de consommation, les deux peuvent coexister (Edell et Burke, 1987 ; Burke et Edell, 1989). Certaines mesures conduisent également à des confusions quand les oppositions proposées ne sont pas

nettes. Par exemple, le PAD propose d'opposer les termes « ennuyé » (« *bored* ») à « relaxé » (« *relaxed* »), termes qui ne sont pas réellement bipolaires (Richins, 1997).

33 Les limites des mesures de l'expérience subjective : la non prise en compte du contexte culturel

Le mot « émotion » n'est pas universel (Russel, 1991), même si le mot existe dans différentes langues. Van Goozen et Frijda (1993) avaient d'ailleurs montré, à partir d'une étude multiculturelle, les difficultés liées à la traduction du vocabulaire exprimant des réactions affectives. Cette étude réalisée dans 6 pays (Belgique, France, Suisse, Italie, Grande Bretagne, Canada, Pays-Bas) montre que si l'on retrouve dans ces différentes cultures les mêmes mots pour exprimer les états affectifs, leur fréquence varie fortement. Le vocabulaire serait donc le même, mais certains mots familiers ou particulièrement usités en Grande Bretagne ne le seraient pas en France. Les termes « apathique » ou « léthargique » utilisés dans le PAD sont difficilement compréhensibles pour des français.

Les théories constructivistes des émotions (Averill, 1980) vont encore plus loin et considèrent que les émotions sont des artéfacts culturels dont les significations sont élaborées et apprises. Comme le langage, les émotions sont donc différentes d'une culture à l'autre. Certaines langues renferment des expressions qui ne possèdent pas d'équivalent en français ou en anglais. L'état affectif « *Amae* » (japonais) ne peut être traduit en français : c'est un sentiment plaisant de dépendance à l'autre. Il en est de même pour l'émotion « *schadenfreude* » qui correspond pour un allemand à un état de plaisir suite à l'infortune de l'autre. Dans différents idiomes africains, un seul mot existe pour expliciter la tristesse et la colère.

En anthropologie, pour qu'une émotion soit ressentie, perçue et exprimée, elle doit appartenir au répertoire culturel de son groupe, l'individu interprétant les situations à travers son système de connaissance et de valeurs. Reconnue en soi et signifiées aux autres, l'émotion même la plus

intime, mobilise un vocabulaire et des mouvements du corps qui diffèrent selon les cultures. C'est l'activité de sens menée par l'acteur qui fabrique l'émotion, non l'événement en lui-même qui suscite une attitude et une affectivité différente chez un autre (Le Breton, 2004). Ce détour en anthropologie ou en psychologie sociale-cognitive nous force à retourner aux anciens débats, souvent passionnés, entre «universalisme» et «relativisme culturel» (Ekman 1980 ; Izard 1971 ; Russel 1991) et à percevoir l'émotion sous un angle nouveau en marketing, qui s'éloigne de l'universalité de nos instruments de mesure. Les anthropologues vont même plus loin et considèrent l'inadaptation des échelles des psychologues pour capter le concept. «Les résultats des études quantitatives sont pris pour des formalisations suggestives du réel alors qu'ils risquent d'être seulement les découpes et les projections des concepteurs des enquêtes bien éloignés des histoires de vie des acteurs et de leur interprétation des situations. L'enquête est par excellence une démarche de décontextualisation comme si les acteurs étaient interchangeables, suspendus dans un vide rempli de chiffres et de présuppositions des enquêteurs » (Le Breton, 2004). Comme le signale l'auteur, l'élément troublant, voire déconcertant, est que, même en travaillant sur le même concept, il puisse exister une telle différence d'approche entre disciplines. La différence de paradigmes est bien irrémédiable, chiffrer la fréquence des émotions et les intégrer dans un modèle explicatif est une tâche impossible par la simple observation ou l'entretien semi-directif. Mais nos choix épistémologiques doivent être clairement assumés et nous devons en comprendre les conséquences. Même si nous connaissons les limites de notre paradigme, notre objectif sera d'essayer de créer un instrument de mesure des émotions qu'un francophone peut ressentir dans un contexte de distribution.

4 La nécessité de créer un instrument contextuel

Afin de vérifier la validité de nos critiques, nous avons mené plusieurs études empiriques.

41 Méthodologie et résultats :

4 études ont été menées :

- Une **première étude qualitative auprès de 84 clients** de magasins différents avait pour objectif de mettre en évidence la diversité et le type des états affectifs ressentis afin de les comparer à ceux proposés dans les instruments de mesures de psychologues. Ces 84 entretiens individuels semi-directifs ont été réalisés in situ, à la fin de la visite des consommateurs. Cette première phase qualitative a abouti à une liste de 90 items représentant des affects extrêmement hétérogènes dont l'intensité varie fortement. **Le vocabulaire obtenu confirme l'idée d'une contextualisation des émotions.** Ce dernier est imagé et diffère des échelles des psychologues. Les émotions ressenties sont des affects complexes qui seront plus difficilement mesurables avec des échelles catégorielles ou des mesures faciales. Reprendre les échelles des psychologues est donc déconseillé. Il est nécessaire d'adapter nos outils à notre champ d'analyse (Lichtlé et Plichon, 2005). Pour ce faire, nous avons mené 3 autres études afin de créer un nouvel instrument de mesure des émotions en distribution.

- Une **seconde étude qualitative auprès d'experts** a été mise en place afin de vérifier que les émotions listées lors de la première étude étaient bien des émotions. Quatre experts ont été interrogés, pour évaluer l'adéquation de chaque item avec le construit étudié. 40 énoncés ont été ainsi supprimés.

- **Deux études quantitatives** ont été ensuite mises en place afin de proposer une nouvelle échelle de mesure des émotions ressenties en magasin. La première d'ordre exploratoire a été administrée auprès de 245 consommateurs, à la sortie de magasins spécialisés. Une analyse en composantes principales a tout d'abord été effectuée, afin d'identifier la dimensionnalité du construit étudié, puis un modèle PLS Path Modelling a été utilisé. Une structure solide à 6 dimensions est alors apparue : la plénitude, l'évasion, la nervosité, le plaisir, la détente et l'oppression. Cette structure fut validée auprès d'un second échantillon de 225 clients de magasin (Pier Import, Yves Rocher, L'Occitane, la Fnac...).

5 Discussion et conclusion

Comme nous avons pu le valider dans notre étude, « l'émotion n'est pas nécessairement attachée à un événement fort au sens où elle est sans cesse présente dans la relation au monde et non seulement quand l'existence sort de l'ordinaire. Les routines du quotidien ne sont pas

moins propices à l'affectivité » (Le Breton, 2004). Consommer, aller dans un hypermarché, acheter sur le net... est source d'affects multiples et variés. Pour analyser le comportement du consommateur, il est nécessaire d'étudier les états affectifs dans nos études en marketing.

La recherche en marketing est pluridisciplinaire et fait ainsi appel à de nombreuses disciplines : psychologie, sociologie, économie, ethnologie, etc. L'utilisation d'instruments de mesure provenant d'autres champs de recherche est donc pratique courante. Les chercheurs les appliquent sans prendre en compte les spécificités de notre contexte de consommation. Très peu de travaux en marketing ont réfléchi au bien fondé de cette transversalité. Notre recherche illustre les limites de telles pratiques et souligne la nécessité d'adapter nos outils de mesure dans un cas particulier : la mesure des émotions en distribution.

La valeur ajoutée de ce travail est de proposer une nouvelle échelle de mesure des émotions applicable dans un contexte de distribution francophone. Pour mesurer les affects en magasin, il est nécessaire d'analyser 6 facettes : la plénitude, l'évasion, la nervosité, le plaisir, la détente et l'oppression. Notre instrument s'éloigne donc des instruments des psychologues couramment utilisés en marketing. Plus simple, au vocabulaire adapté au contexte, il permet d'appréhender la diversité des affects ressentis dans un point de vente. Les distributeurs pourront ainsi créer des cartes du positionnement émotionnel de leur magasin et de la concurrence. Ils pourront de plus mieux comprendre l'effet de l'atmosphère sur le ressenti émotionnel de leur clientèle (Daucé et Rieunier, 2002). Toutefois, comme de nombreux psychologues, nous avons choisi de nous ancrer dans une démarche quantitative en ayant recours à un instrument de mesure verbal.

Comme toute recherche, ce travail comporte des limites qui sont autant de voies de recherches futures. Il est nécessaire de valider cet instrument dans d'autres types de magasins, notamment les hypermarchés. De plus, nous devons nous interroger sur le bien fondé de l'utilisation d'échelles verbales et le recours à des démarches quantitatives pour mesurer les émotions.

Dans la tradition de nombreux sociologues et des psychologues, les marketers ont tendance à avoir recours aux études quantitatives pour analyser les émotions. En effet, comme le notent Rimé et Scherer (1988), chiffrer la fréquence et le contenu des émotions quotidiennes d'une population est une tâche impossible via des études qualitatives (observation ou entretien semi-directif). L'objectif est de mesurer alors

qu'une approche qualitative telle pratiquée par les anthropologues, vise plutôt à comprendre les rapports au monde des acteurs, leurs interactions, la manière dont ils vivent et sentent le monde qui les entoure selon l'interprétation qu'ils en font. Comme le souligne Le Breton (2004) : « Quelles sont par exemple les nuances pour les acteurs quand ils déclarent éprouver un sentiment de bonheur, de joie, de contentement, de plaisir, de jubilation, de relaxation, de sérénité, de soulagement : parlent-ils de la même chose, et peut-on donc comptabiliser ces déclarations dans les mêmes colonnes. De même quand ils parlent de colère, de tristesse, de frustration, de déception, de stress, de désespoir, d'irritation, de haine, de jalousie, d'ennui, de mépris, etc. Comment croire qu'ils mettent les mêmes significations sous ces termes ». Pour Cicourel (1964) : « Les innombrables perceptions et interprétations inhérentes à ces études sont invariablement perdues pour le lecteur ou les utilisateurs de ces matériaux ».

Si l'intérêt majeur de nos outils de mesure est qu'ils nous permettent de modéliser facilement le comportement des consommateurs, et plus particulièrement celui du client de magasin, le recours classique aux échelles métriques empêche de comprendre avec précision ce que sont les affects des individus. Comme le remarque l'ethnologue David Le Breton (2004), « l'élément troublant, voire même déconcertant, est que, travaillant sur la même topique, il puisse y avoir une telle différence d'approche entre chercheurs de disciplines différentes, qui ne s'en respectent pas moins ». Le marketing étant une science par essence transversale, ses chercheurs devront, en premier lieu, réfléchir à la démarche épistémologique qu'ils souhaiteront suivre pour étudier les émotions ressenties. Souhaitent-ils chiffrer ou approfondir ? Le choix de la démarche variera et les résultats obtenus différeront.

Bibliographie :

Aaker D.A, Stayman D.M. et Vezina R., "Identifying feelings elicited by advertising", *Psychology and Marketing*, vol.5, 1988, p.1-16.

Ark W., Dryer D.C. et Lu D.J., « The Emotion Mouse », Acte du colloque HCI International, 1999.

Averill J.R., A constructivist view of emotion, In R. Plutchik and H. Kellerman (ed.), *Emotion, theory, research and experience: theories of emotion* (1, 305-340). New York: Academic Press, 1980.

Batra R. et Holbrook M.B., "Developing a typology of affective response to advertising", *Psychology and Marketing*, vol.7, 1990, p.11-25.

Burke M.C. et Edell J.A., "The impact of feelings on ad-based affect and cognition", *Journal of Marketing Research*, vol. 26, 1989, p.69-83.

Cicourel A., *Method and measurement in sociology*, New York, Free Press, 1964.

Damasio A.R. , *L'erreur de Descartes : la raison des émotions*, Odile Jacob, 1994

Darwin C., *The Expression of Emotions in Man and Animals*, London, Muray, 1872.

Daucé B., *La diffusion de senteurs d'ambiance dans un lieu commercial : intérêts et tests des effets sur le comportement*, Thèse de Sciences de Gestion, Université de Rennes 1, 27 janvier 2000.

Daucé B. et Rieunier S., « Le marketing sensoriel du point de vente », *Recherche et Application en Marketing*, vol.4, n° 17, 2002, p. 45-65

Dawson S., Bloch P.H. et Ridgway N.M., "Shopping motives, emotional states and retail outcomes", *Journal of Retailing*, vol. 66, 1990, p.408-427.

Derbaix C., « L'impact des réactions affectives induites par les messages publicitaires : une analyse tenant compte de l'implication », *Recherche et Application en Marketing*, vol.10, n°2, 1995, p. 3-30

Derbaix C. et Pham M.T., « Pour un développement des mesures de l'affectif en marketing : Synthèse des prérequis », *Recherche et Application en Marketing*, vol.4, n° 4, 1989, p.71-87.

Derbaix C. et Pham M.T., « Affective reactions to consumption situations : A pilot investigation », *Journal of Economic Psychology*, vol.12, 1991, p.352-355.

Derbaix C. et Grégory P., *Persuasion : la théorie de l'irrationalité restreinte*, Economica, Paris, 2004.

Derbaix C. et Poncin I., « Mesure des réactions affectives déclenchées par les stimuli publicitaires : une comparaison des principales modalités », *Actes du Colloque Association Française du Marketing*, Bordeaux, 1998, p.189-216

Dion D., *La foule dans un contexte commercial : concept, mesure, effets sur les comportements*, Thèse de doctorat en Sciences de Gestion, Université de Rennes 1, Rennes, 1999.

Edell J.A. et Burke M.C., "The power of feelings in understanding advertising effects", *Journal of Consumer Research*, vol.14, 1987, p.421-433

Ekman P., "The Face of Man. Expressions of universal emotions in a New Guinea Village", Graland STPM Press, New-York & London, 1980.

Ekman P., "Emotion in the Human Face", 2ème édition, New York, Cambridge University Press, 1982.

Ekman P., "Strong evidence for universals in facial expressions : A reply to Russell's Mistaken critique", *Psychological Bulletin*, vol.115, n°2, 1994, p.268-287.

Fridlund A.J., "The new ethology of human facial expressions", In J.A. Russel et J.M. Fernandez-Dols (Eds), *The psychology of facial expression*, 103-128, Cambridge, University Press, 1997

Frijda N.H., « Les théories des émotions : Un bilan, In Rimé et Scherer », Textes de Base en Psychologie: les émotions, Delachaux et Niestlé, 1989.

Graillot L., « Evolution de la place des émotions dans la recherche en comportement du consommateur: Un état de l'art », Actes du Xème congrès de l'Association Française de Marketing, vol.10, 1994, p.15-37.

Gröppel-Klein A. et Baun D., "The role of consumers'arousal for retail stores – results from an experimental pilot study using electrodermal activity as indicator", *Advances in Consumer Research*, vol.28, 2001, p. 412-419.

Havlena W.J. et Holbrook M.B., "The varieties of consumption experience : comparing two typologies of emotion and consumer behaviour", *Journal of Consumer Research*, vol.13, n° 3, 1986, p.394-404.

Havlena W.J., Holbrook M.B. et Lehmann D.R., "Assessing the validity of emotional typologies", *Psychology and Marketing*, Summer, vol.6, n°2, 1989, p. 97 -113

Holbrook M.B. et Batra R., "Assessing the role or emotions as mediators of consumer responses to advertising", *Journal of Consumer Research*, vol.14, december, 1987, p.404-420.

Holbrook M.B. et Westwood R.A., "The role of emotion in advertising revisited: Testing a typology of emotional responses" In P. Cafferata and A. Tybout (ed.), *Cognitive and affective responses to advertising* (353-371). MA : Lexington Books, 1989.

Huang M.H., "The Theory of emotions in marketing", *Journal of Business and Psychology*, vol.16, n° 2, Winter, 2001, p.239-247

Izard C.E., "Face of emotion", New-York: Appleton-Century- Croft, 1971

Izard C.E., "Human Emotions", New York, Plenum Press, 1977.

Kirouac G., " Les émotion », In *Introduction à la Psychologie de la Motivation*, R.J. Vallerand et E.E. Thill, (ed.) Vigot, 1993.

Kirsch D. , "The Sentic Mouse : developing a tool for measuring emotional valence", S.M. thesis, MIT, Media Arts and Sciences, 1997

Le Breton D., « Les passions ordinaires. Anthropologie des émotions », Petite Bibliothèque Payot, Paris, 2004

Le Breton D., « Les émotions dans la vie quotidienne : approche critique de Klaus Scherer », *Informations sur les Sciences Sociales*, vol.43, n°4, 2004, p. 621-631.

Lebrun A.M., *Le Comportement d'Achat du Touriste Urbain dans la Ville de Destination*, Essai de Conceptualisation, thèse ès Sciences de Gestion, 1996.

Lichtlé M.C. et Plichon V., « Les émotions ressenties dans un point de vente : proposition d'une nouvelle échelle de mesure adaptée au contexte français », Actes du Colloque Etienne Thil, Septembre, CD ROM, 2004

Lichtlé M.C. et Plichon V., « La diversité des états affectifs dans un point de vente », *Décisions Marketing*, vol.39, 2005, p.33-42

Lunardo R., Le contrôle perçu du consommateur dans l'expérience de magasinage: proposition d'un cadre conceptuel et d'une mesure de son influence sur le comportement, Thèse de Doctorat en Sciences de Gestion, Université de Bourgogne, 2007.

Mehrabian A. et Russel J.A., "An Approach to Environmental Psychology", Cambridge, AM : M.I.T. Press, 1974.

Menon K. et Dubé L., "Ensuring greater satisfaction by engineering salesperson response to customer emotions", *Journal of Retailing*, vol.76, n° 3, 2000, p. 285-308.

Menon K et Dube L., "The effect of emotional provider support on angry versus anxious consumers", *International Journal of Research in Marketing*, vol.24, 2007, p.268-237.

Picard R.W. et Scheirer J., "The Galvactivator: A Glove that senses and communicates skin conductivity", *Proceedings from the 9th International Conference on Human-Computer Interaction*, Nouvelles Orléans, August, 2001

Plichon V., Analyse de l'influence des états affectifs sur le processus de satisfaction dans la grande distribution, thèse de doctorat ès sciences de gestion, Université de Bourgogne, 1999.

Plutchik R., "Emotion : A Psychoevolutionary Synthesis", New York, Harper & Row, 1980.

Richins M.L., "Measuring emotions in the consumption experience", *Journal of Consumer Research*, vol.24, September, 1997, p.127-146.

Rimé B. et Scherer K., « Les émotions », Neuchâtel, Delachaux-Niestlé, 1988.

Russell J.A., "Evidence of convergent validity on the dimensions of affect", *Journal of Personality and Social Psychology*, vol.36, n°10, 1978, p.1152-1168.

Russel J.A., "Culture and the categorization of emotions", *Psychological Bulletin*, vol.11, n°3, 1991, p.426-450.

Tomkins S.S., "Affect as amplification : somme modifications in theory", In R. Plutchick and H. Kellermans ed., *Emotion, theory, research and experience : Theories of emotions*, (1, 141-165). New York : Academic Press, 1980.

Van Goozen S. Et Frijda N.H., "Emotion words used in six European Countries", *European Journal of Social Psychology*, vol.23, 1993, p. 89-95.

Zeitlin D.M. et Westwood R.A., "Measuring emotional response", *Journal of Advertising Research*, 1986, p.34-44



Patrice COTTET est maître de conférences à l'IUT de Troyes, département Techniques de Commercialisation. Son laboratoire est REGARDS. Ses thèmes de recherche sont le comportement du consommateur et la négociation. Les principales recherches ont été publiées dans diverses revues (*Décisions Marketing*, *Journal of Consumer Marketing*, *Gestion 2000*, *Négociations*, *Journal of Marketing Trends*) et dans divers colloques (Congrès de l'Association Française du Marketing, de l'European Marketing Academy, The Lalonde Conference in Service Management and Consumer Behavior, Journées de Recherche en Marketing de Bourgogne...). Un ouvrage sur la négociation est paru aux éditions Vuibert.



Marie-Christine LICHTLE est Professeur des Universités à l'Université de Montpellier 1 (laboratoire MRM). Ses travaux portent sur les réactions du consommateur et notamment sur les états affectifs qu'il peut ressentir. Elle a publié dans des revues telles que *Recherche et Applications en Marketing*, *Décisions Marketing*, *International Journal of Advertising*, *Journal of Consumer Marketing* et dans des colloques variés (Congrès de l'Association Française du Marketing, de l'European Marketing Academy, The Lalonde Conference in Service Management, The Lalonde Conference in Marketing Communications and Consumer Behavior...).



Véronique PLICHON est maître de conférences à l'IUT de Tours, département Techniques de Commercialisation. Ses laboratoires de recherche sont le VALLOREM et le CRESCEM. Véronique Plichon travaille sur le comportement du consommateur. Elle a publié dans diverses revues (RAM, RFG, DM, *Gestion 2000*, JCM) et dans de nombreux colloques (AFM, Thil, EMAC, La Londe les Maures, JRMB, etc.).

Etude d'une bougie à double étincelle pour la combustion propre

Dragos Astanei^{*, **}, Stéphane Pellerin^{*}, Bogdan Hnatiuc^{*}, François Faubert^{*}, Nuno Cerqueira^{****}, Marius Ursache^{**}**

- ^{*} GREMI, Université d'Orléans-CNRS
IUT Bourges, Département Mesures Physiques
63 Avenue de Lattre de Tassigny, 18020 Bourges, France
- ^{**} Université Technique « Gheorghe Asachi » de Iasi
Faculté de Génie Electrique
Bd. Dimitrie Mangeron, nr.67, 700050 Iasi, Roumanie
- ^{***} Université Maritime de Constanta
Str. Mircea cel Batran, Nr.102-104, Constanta, Roumanie
- ^{****} GREMI, Université d'Orléans-CNRS
Faculté des Sciences à Bourges
Rue Gaston Berger, BP 4043, 18028 Bourges cedex, France

dragos.astanei@etu.univ-orleans.fr, stephane.pellerin@univ-orleans.fr, bhnatiuc@ee.tuiasi.ro, francois.faubert@univ-orleans.fr, nuno.cerqueira@univ-orleans.fr, ursachemarius2010@yahoo.com

**Sections de rattachement : 62,
Secteur : Secondaire**

RÉSUMÉ. Dans cet article est présentée une comparaison du point de vue de la qualité de la combustion entre deux bougies d'allumage différentes : une bougie classique et une nouvelle bougie d'allumage ayant une géométrie innovante et pouvant fournir deux étincelles simultanément. Les deux bougies ont été testées sur un banc d'essai moteur multidisciplinaire de type DELTALAB EX1000 équipé d'un moteur monocylindrique HONDA GX31. Les gaz d'échappement ont été analysés à l'aide d'une sonde de mesure de la richesse ROTRONICS CMR101, associée à une sonde Lambda large bande. Les deux types de bougies étudiées sont connectés à une bobine d'allumage électronique contrôlée par

une source haute-tension à microcontrôleur AT89S52. L'influence des signaux de commande sur la combustion (nombre et largeur des impulsions de commande pour chaque cycle de combustion) a également été étudiée.

MOTS-CLÉS : plasma, bougie d'allumage, moteur à combustion interne.

1. Introduction

Les problèmes de pollution produite par la majorité des voitures sont bien connus, aujourd'hui. Il faut y associer également la diminution des ressources pétrolières afin de mieux comprendre la multitude des recherches et mesures entreprises dans ce domaine, notamment la mise en place de normes beaucoup plus restrictives du point de vue des émissions polluantes imposées aux constructeurs pour tous les types de véhicules. Pour répondre aux exigences demandées, la recherche doit trouver de nouvelles techniques pour améliorer la combustion, avec une émission plus faible de produits polluants et une réduction de la consommation. Il s'agit donc de développer des moteurs plus performants, de meilleurs catalyseurs, de nouveaux combustibles, éventuellement même obtenus à bord des véhicules, etc.

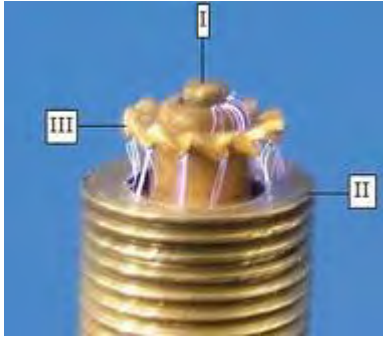
La réalisation d'un moteur à allumage commandé, propre et économe, nécessite une combustion aussi rapide que parfaite des mélanges pauvres sous une pression élevée. Pour allumer le mélange air/essence dans la chambre de combustion des moteurs thermiques il est nécessaire qu'une décharge électrique (étincelle) soit déclenchée entre les électrodes d'une bougie d'allumage. Le développement de la combustion dépend alors énormément des interactions entre la flamme et le mouvement du milieu. Cependant, l'étincelle électrique couramment utilisée, reste très localisée et ne peut pas assurer, d'une manière suffisamment rapide l'allumage d'un mélange d'hydrocarbure et d'air pour permettre d'augmenter le régime moteur. Afin d'augmenter la puissance d'un moteur thermique, il est nécessaire d'obtenir, pour chaque cycle, une combustion rapide et complète du mélange, ce qui implique également de fournir à l'étincelle la quantité maximale d'énergie électrique. Pour « faciliter » et pour « accélérer » la combustion il est également nécessaire d'avoir un volume plus homogène de plasma et d'augmenter l'interaction entre le plasma et le mélange air/hydrocarbures. Sur la base de ces hypothèses un certain nombre de concepts ont été proposés, mais ils restent toujours

généralement très difficiles à mettre en œuvre par les constructeurs automobiles (Dale et al., 1997). C'est le cas notamment des dispositifs d'allumage qui utilisent d'autres types de décharges électriques que celles fournies par une bougie classique : laser pulsé (Dale et al., 1978), décharges corona (Sher et al., 1992) ou décharges de type arc rampant (Janca et al., 2000).

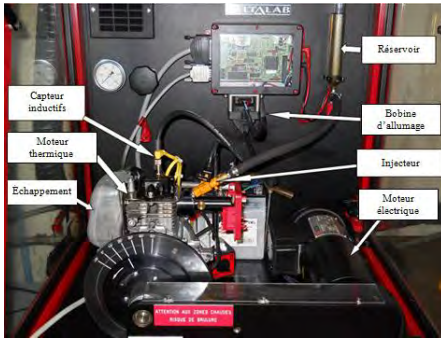
Un certain nombre de solutions proposées pour améliorer le processus de combustion impliquent des modifications des moteurs et, pour cette raison, restent peu envisageables dans l'industrie des moteurs à combustion. C'est le cas du système d'allumage PJC (*Pulsed Jet Combustor*) proposé par Renault, ou des systèmes *Plasma Jet Igniter* (McIntyre 2000) et *Raiplug Igniter* (Edwards et al., 1983), (Clements et al., 1981).

D'autres concepts sont basés sur la seule modification d'une bougie classique et/ou du système de commande afin d'augmenter le volume de plasma utilisé pour allumer les hydrocarbures dans la chambre de combustion, ou au moins d'assurer le déclenchement de la décharge au moment opportun pour chaque cycle de combustion. C'est le cas de la bougie multi-électrodes développée par Bosch (Bosch) ou de la bougie à radiofréquence (Renault SAS, 2011).

C'est dans cette catégorie que peut aussi être classé le dispositif d'allumage proposé par notre équipe : l'élément principal en est une bougie d'allumage classique, modifiée de façon à comporter trois électrodes (Cf. Figure 1a) : une électrode centrale (I), reliée à la source impulsionnelle haute-tension (généralement une bobine d'allumage contrôlé) ; l'électrode de masse (II); et une électrode intermédiaire (III) à un potentiel flottant. Il est ainsi possible d'obtenir, sans avoir à modifier le moteur lui-même ni même le système électrique du véhicule, deux décharges simultanément, avec une longueur cumulée plusieurs fois plus élevée que celle d'une étincelle produite par une bougie d'allumage classique.



(a)



(b)

Figure 1 . Bougie double (a) et Banc moteur (b).

2. Le montage expérimental

Les deux bougies étudiées (double et classique) ont été implantées et testées sur un banc d'essais moteur multidisciplinaire de type DELTALAB EX1000 (Cf. Figure 1b) équipé d'un moteur HONDA GX31 (Honda Motor Co., 2003) et qui permet de réaliser des études complètes sur un moteur monocylindrique à essence avec systèmes électroniques d'injection et d'allumage. Le banc est piloté par logiciel spécialisé qui permet l'acquisition de différents paramètres liés aux caractéristiques de fonctionnement mécanique tels que : la consommation en carburant, la vitesse et la température du moteur, la charge et l'injection d'air. Il est également possible d'ajuster l'angle d'avance à l'allumage et les temps d'injection.

Le moteur fonctionne sur la base de caractéristiques d'allumage et d'injection définies par l'utilisateur. Le signal de synchronisation, noté « sync », est fourni par un capteur inductif monté dans la tête du cylindre (culasse) et traité par le logiciel qui commande alors la bobine d'allumage et l'injection de carburant.

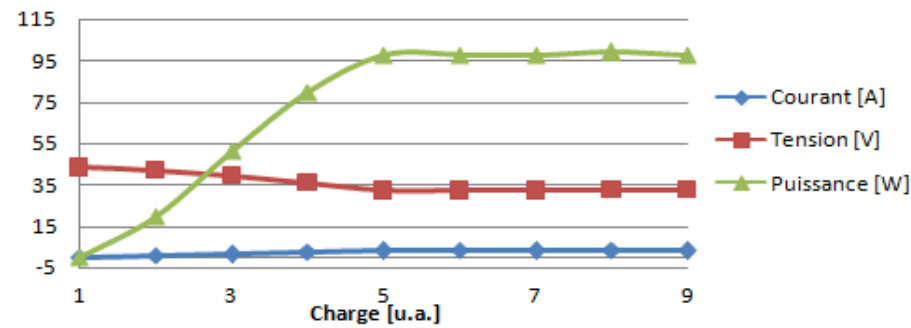


Figure 2. Caractéristique puissance / charge du moteur électrique.

Le moteur thermique est connecté à l’aide d’une courroie à un moteur électrique qui fonctionne initialement en régime de moteur pour lancer le moteur thermique, puis qui passe ensuite en régime de générateur électrique pour créer un couple résistant sur l’arbre du moteur thermique. L’énergie produite par le générateur électrique est dissipée par des résistances de puissance, dont le choix permet de modifier la charge sur l’arbre du moteur : la figure 2 présente la puissance électrique en sortie du générateur en fonction du choix de la charge (en unité arbitraire).

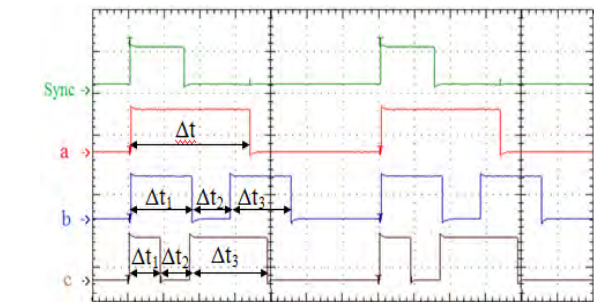


Figure 3. Les formes d'ondes des signaux de commande.

Outre l'alimentation disponible directement sur le banc moteur, une nouvelle alimentation électrique de la décharge a été développée à partir d'une bobine d'allumage contrôlée de type AUDI/VW 6N0 905 104, commandée par une source de puissance basée sur un microcontrôleur (AT89S52). Ce dispositif offre la possibilité de modifier la forme du signal de commande en modifiant le logiciel chargé dans la mémoire du microcontrôleur. Trois types de signaux sont utilisés pour les tests (Cf. Figure 3).

Dans le premier cas, noté « a », à la réception de l'impulsion de synchronisation, le microcontrôleur fournit une impulsion de largeur Δt variable de 0 à 6 ms et permet un réglage de déphasage dans une gamme d'environ 60° : ce fonctionnement est équivalent à une commande d'allumage classique utilisée pour les moteurs de véhicules automobiles. Les essais réalisés ont été faits avec des valeurs de largeur d'impulsion Δt de 1.5, 2.4, 3.0 et 3.4 ms.

Pour le second cas, « b », la réponse du microcontrôleur au signal de synchronisation est la transmission de deux impulsions fixes, de largeurs identiques, pour une durée cumulée totale Δt fixée à ($\Delta t_1 + \Delta t_3 = 3,4$ ms), générant donc deux décharges successives. L'intervalle de temps Δt_2 , entre les deux impulsions est réglable : les valeurs de 1,0 et 2,0 ms ont été retenues pour les essais réalisés.

Dans le dernier cas, « c », deux décharges sont à nouveau obtenues successivement, mais la durée de la première impulsion ($\Delta t_1 = 0,8$ ms) et l'intervalle entre les deux impulsions ($\Delta t_2 = 0.9$ ms) sont fixés, tandis que la largeur Δt_3 de la seconde impulsion est variable. Pour les essais réalisés, elle sera de $\Delta t_3 = 2,2$ ou $2,6$ ms, pour des durées cumulées Δt de décharges égales respectivement à 3,0 et 3,4 ms.

Pour évaluer la qualité de la combustion à partir de la concentration d'oxygène dans les gaz d'échappement, un prélèvement est réalisé en sortie moteur et connecté à une sonde à oxygène large bande UEGO gérée par une carte de mesure air / essence de type ROTRONICS CMR101 et qui permet l'affichage des valeurs déduites telles que la richesse, le rapport air/carburant, le taux d'oxygène et l'excès d'air indiqué par le paramètre Λ - λ . Ce dernier désigne l'écart entre le mélange air-carburant réellement disponible et le rapport de masses théorique nécessaire (14,6 : 1) pour obtenir une combustion complète théorique idéale: si $\lambda < 1$: il y a déficit d'air et donc mélange pauvre ; si $\lambda > 1$, il y a

excès d'air et donc mélange riche et possibilité d'atteindre la limite d'inexplosivité du mélange et un fonctionnement chaotique du moteur.

Enfin, les paramètres électriques de la décharge (tension à l'aide d'un diviseur de tension 1/1000 et courant électrique à l'aide d'un shunt de $56\ \Omega$ choisi pour sa tolérance et son très faible coefficient de variation en température) sont mesurés en utilisant un oscilloscope de type LECROY WaveSurfer 64MXs-A large bande (600 MHz, 5 GS/s), afin de déterminer l'énergie et la durée de vie de la décharge.

3. Résultats

Les deux bougies utilisées pour cette étude ont un filetage extérieur M10 ; la seule différence consiste dans la longueur de la décharge : dans le cas de la bougie classique la distance entre les électrodes est 0,7 mm, dans le cas de la bougie double la distance cumulée est de 2,3 mm (1,0 mm pour la première décharge et 1,3 mm pour la seconde). Des méthodes optiques ont été mises en œuvre pour déterminer le volume de plasma généré et la surface d'interaction entre plasma et mélange air/essence, en considérant par ailleurs que le plasma possède une symétrie cylindrique. Ces déterminations, qui ne pouvaient être effectuées in situ dans la chambre moteur, ont été effectuées pour un plasma produit dans de l'air, à pression et humidité atmosphériques. Ainsi, pour la bougie classique, le canal de plasma a un diamètre d'environ 1,2 mm, un volume de $0,8\ \text{mm}^3$ et une surface extérieure de $2,6\ \text{mm}^2$ (surface d'interaction entre le plasma et le mélange air/essence). Dans le cas de la bougie double, on obtient un diamètre plus faible que dans le premier cas, 0,5 mm, mais un volume et une surface extérieure plus importantes, respectivement de $0,9\ \text{mm}^3$ et $3,6\ \text{mm}^2$. Par conséquent, la bougie double permet d'obtenir une surface d'interaction 1,4 fois plus élevée avec une même quantité d'énergie électrique déposée dans la décharge (Cf. Tableau 1).

Signal de commande	E [mJ]		τ [ms]	
	classique	double	classique	double
Stand moteur	36	35	0,30	0,27
« a » $\Delta t=1,5ms$ 1 seule décharge	40	37	0,38	0,25
« a » $\Delta t=2,4ms$ 1 seule décharge	74	69	1,27	0,31
« a » $\Delta t=3,0ms$ 1 seule décharge	96	108	1,65	0,75
« a » $\Delta t=3,4ms$ 1 seule décharge	107	119	1,73	0,84
« b » $\Delta t=3,4ms$ $\Delta t_2=1,0ms$ 1 ^{ère}	25	38	0,26	0,27
« b » $\Delta t=3,4ms$ $\Delta t_2=1,0ms$ 2 ^{ème}	26	58	0,76	0,72
« b » $\Delta t=3,4ms$ $\Delta t_2=2,0ms$ 1 ^{ère}	35	45	0,31	0,24
« b » $\Delta t=3,4ms$ $\Delta t_2=2,0ms$ 2 ^{ème}	35	57	1,16	0,6
« c » $\Delta t=3,0ms$ $\Delta t_3=2,2ms$ 1 ^{ère}	14	14	0,21	0,21
« c » $\Delta t=3,0ms$ $\Delta t_3=2,2ms$ 2 ^{ème}	49	42	1,20	3,30
« c » $\Delta t=3,4ms$ $\Delta t_3=2,6ms$ 2 ^{ème}	12	11	0,21	0,22
« c » $\Delta t=3,4ms$ $\Delta t_3=2,6ms$ 1 ^{ère}	46	50	1,13	0,50

Tableau 1. Valeurs des énergies E et des durées de vie τ des différentes décharges.

Les résultats regroupés dans le tableau 1 montrent qu'il n'y a pas de différence importante entre les énergies E des décharges produites par les deux types de bougies, alors même qu'il existe une différence entre les valeurs maximales de tension et de courant atteintes : par exemple, pour un signal de type « a » avec $\Delta t=3ms$, la tension et le courant au moment de l'allumage d'une décharge sont respectivement d'environ 25 kV et 72 mA pour la bougie classique et d'environ 37,5 kV et 55 mA pour la bougie double. De fait, conformément à la loi de Paschen de variation de la tension de claquage en fonction de la distance et de la pression, celle-ci est plus importante dans le second cas puisque que la distance entre les électrodes de la bougie double est beaucoup plus importante.

La plus grande différence entre les décharges produites par la bougie double et celles produites par une bougie classique, réside dans leur durée de vie τ , puisqu'elle est beaucoup plus importante dans le deuxième cas et, par ailleurs, augmente avec l'énergie de la décharge, c'est à dire pour des signaux de commande de largeur plus importante.

La Figure 4 montre l'influence de la charge et du signal de commande sur le processus de combustion (évalué par le paramètre λ) pour les deux

types de bougie, pour une même durée cumulée de décharge de $\Delta t = 3,4$ ms, une injection d'air similaire, une vitesse moteur maintenue à 2000 tr/min (à moins de 10% près) et une consommation en essence identique, d'environ 2,2 ml/min.

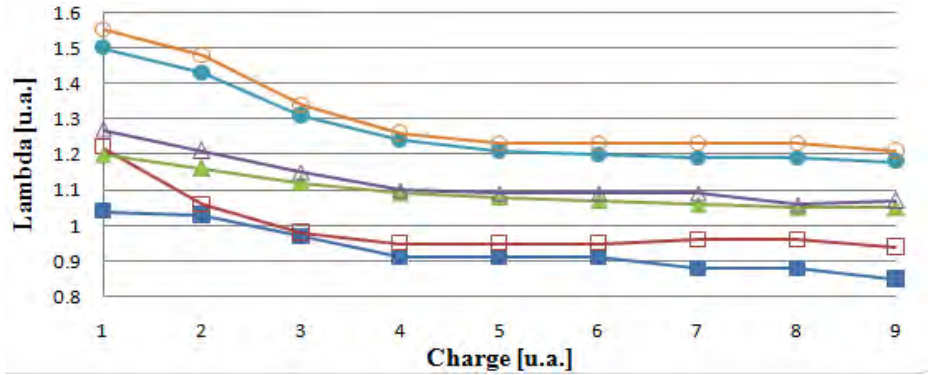


Figure 4. Influence du type de bougie et du signal de commande sur la combustion, pour une durée cumulée de décharge identique $\Delta t = 3,4$ ms, à vitesse et consommation constante [Symboles vides = Bougie classique - Symboles pleins = Bougie double ; △ ▲ type « a » ; ○ ● type « b » avec $\Delta t_2 = 1,0$ ms, et □ ■ type « c » avec $\Delta t_3 = 2,6$ ms].

L'utilisation de la bougie double permet dans tous les cas une légère amélioration de la combustion, notamment quand l'énergie fournie à la décharge est plus importante et quand la pression dans le cylindre au moment d'allumage est plus faible : ceci est à rapprocher de l'augmentation de la surface d'interaction du plasma avec le mélange air/essence. Le signal de commande de type « c » (deux impulsions pour chaque cycle de combustion, la première d'une largeur de 0,8 ms et la deuxième de 2,6 ms) semble donner les meilleurs résultats, alors que la commande de type « b » ne permet jamais une combustion complète du mélange. Néanmoins, ces conclusions restent partielles, et il faudrait prendre aussi en compte la position du piston dans le cylindre au moment de l'allumage. En effet, les études des caractéristiques courant-tension de la décharge, montrent clairement que l'allumage se produit à la fin de l'impulsion de commande, ce qui signifie que, dans le cas de signaux de durées différentes, l'allumage du mélange air/essence n'est pas réalisé à

des pressions identiques, modifiant d'autant les caractéristiques de fonctionnement du moteur (Kuo 1996, Eriksson et Anderson 2002).

4. Conclusions

La quantité d'énergie consommée pour la production d'une étincelle est quasiment identique pour les deux types de bougie d'allumage utilisées (double et classique). Néanmoins, dans le cas de la bougie double l'énergie est consommée plus vite (durée de vie plus faible) et la puissance instantanée de la décharge au moment de l'amorçage de l'étincelle est beaucoup plus importante. Par ailleurs, la bougie double permet d'obtenir une surface d'interaction entre le milieu plasmagène et le mélange air/essence environ 1,4 fois supérieure à celle d'une bougie classique de mêmes dimensions.

Les analyses des gaz d'échappement ont montré que la qualité de la combustion est meilleure si l'énergie fournie à la décharge a une valeur plus importante. Et si pour un système d'allumage classique, on ne peut pas noter de différence importante entre l'utilisation d'une bougie classique ou de celle double, par contre, cette dernière permet d'améliorer la combustion lorsque l'énergie de la décharge est plus importante.

La prochaine étape de cette étude, sera de corrélérer le fonctionnement du moteur dans les différents cas envisagés ici, avec la richesse du mélange en entrée, mais aussi avec un choix judicieux et adapté de l'avance à l'allumage. Enfin, en complément du paramètre λ , il est envisagé de faire une analyse chimique complète en ligne des gaz d'échappement, afin de suivre les rejets de NOx et de COx engendrés par chacun des dispositifs utilisés.

Remerciements

Une partie de ces travaux a été réalisée avec Melles S. Massicot et C. Muriasco, et MM. K. Forest et T. Pinaud-Meunier, étudiants en Mesures Physiques à l'IUT de Bourges (promotion 2012), dans le cadre de leur projet tuteuré : qu'ils soient ici remerciés d'avoir accepté de s'impliquer dans cette thématique de recherche au laboratoire.

Bibliographie

Bosch « bougie Super 4 », <http://www.bosch.fr/rechange/index.asp?menu=m-6&ssmenu=s-1>

Clements R.M., Smy P.R., Dale J.D., « An Experimental Study of the Ejection Mechanism for Typical Plasma Jet Igniter », *Combustion and Flame*, vol. 42, 1981, p. 287-295.

Dale J.D., Chekel M.D., Smy P.R., « Application of high energy ignition systems to engines », *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 23, 1997, p. 379-398.

Dale J.D., Smy P.R., Clements R.M., « Laser ignited internal combustion engine – An experimental study », *Trans. SAE paper 780/329*, vol. 87-2, 1978, p. 1539-1548.

Edwards C.F., Oppenheim A.K., Dale J.D., « A Comparative Study of Plasma Ignition Systems », *SAE Technical Paper Series No. 830479*, 1983.

Eriksson L., Andersson I., « An Analytic Model for Cylinder Pressure in a Four Stroke SI Engine », *SAE Technical Paper 2002-01-0371*, 2002, doi:10.4271/2002-01-0371, 2002.

Honda Motor Co., « Honda engines GX22, GX31 – Owner's Manual », Ltd., 2003.

Janca J., Tesal C., Hosek F., Doleisi B., « The high pressure discharge as a new type of ignition of fuel mixture in spark ignition engines », *Internal Report – Department of Physical Electronics, Faculty of Science – Masaryk University*, 2000.

Kuo P.S., « Cylinder Pressure in a Spark-Ignition Engine: A Computational », *J. Undergrad. Sci.*, vol. 3, 1996, p. 141-145.

McIntyre D.L., « The coaxial Cavity Resonator as a Prototype RF IC Engine Ignition Source », *Master of Science in Mechanical Engineering*, West Virginia University, 2000.

Renault SAS, « Bougie multi-étincelles à chambre ouverte », *Fascicule de brevet européen*. Numéro de dépôt 06726308.7. 07.09.2011. EP 1 869 739 B1, 2011.

Sher E., Ben –Ya'Ish J., Pokryvailo A., « A corona spark plug system for spark ignition engines », *SAE paper 920/810*, 1992.

Tribbet E., Froehlich E., Bayer L., « Effects of Ignition Timing, Equivalence Ratio and Compression Ratio on RDH Engine Performance », *Mechanical Eng. Dept, Stanford University*.

Mini CV et photo de tous les auteurs



Dragoș Astanei a obtenu le diplôme d'ingénieur et le diplôme de master en génie électrique à l'Université Technique « Gheorghe Asachi » de Iasi, Faculté de Génie Electrique, Roumanie, respectivement en 2009 et 2011. En octobre 2011, il a débuté une thèse en co-tutelle entre l'Université Technique de Iasi et l'Université d'Orléans (Laboratoire GREMI / Site de Bourges) sur l'amélioration des systèmes d'allumage pour les moteurs à combustion interne.



Stéphane Pellerin est Professeur à l'Université d'Orléans, rattaché à l'IUT de Bourges (Département Mesures Physiques) et au laboratoire GREMI (UMR 7344). Il a obtenu son doctorat en physique des plasmas en 1994. Ses domaines de recherche concernent principalement les applications des plasmas à haute pression (allumage, soudage, plasma induit par laser) et leurs caractérisations par spectroscopie optique d'émission et spectroscopie laser.



Bogdan Hnatiuc est diplômé de la Faculté de Génie Electrique, Université Technique de Iasi (Roumanie) en 1995 et obtient son master l'année suivante. Il obtient son doctorat en physique des plasmas à l'Université Orléans (France) en 2002. Il est actuellement enseignant à l'Université Maritime de Constanta. Ses recherches portent sur les applications des décharges électriques de type plasma froid.



François Faubert est enseignant-chercheur à l'Université d'Orléans, rattaché à l'IUT de Bourges, où il est Directeur du Département Mesures Physiques et au laboratoire GREMI (UMR 7344). Il a obtenu son doctorat en sciences appliquées en 1990. Spécialisé dans l'analyse physico-chimique, ses domaines de recherche concernent principalement les plasmas basse-pression pour la génération de nano-poudres et leur caractérisation (spectroscopie de masse in situ).



Nuno Cerqueira a obtenu son doctorat en physique des matériaux céramiques et traitement de surfaces à l'Université de Limoges, en 2002. Il est actuellement enseignant-chercheur à l'Université d'Orléans, rattaché au Collegium Sciences et Techniques (site de Bourges) et au laboratoire GREMI (UMR 7344). Ses principaux domaines de recherche concernent la physique et la chimie des plasmas et leur diagnostic par spectroscopie et interférométrie.



Marius Ursache a obtenu son diplôme en génie électrique de l'Université Technique « Gheorghe Asachi » de Iasi, Roumanie, en 2009. Il y prépare actuellement une thèse de doctorat à la Faculté de Génie Electrique, dans le domaine des applications des sources de plasma froid à pression atmosphérique et de leur diagnostic.

Diagnostic moléculaire des champignons contaminants de l'habitat : le cas particulier de *Serpula lacrymans*.

Charlotte Marin-Laot¹, Christophe Lambert², Georges Barbier¹, Gaétan Le Floch^{1,3*}

1. Université de Bretagne Occidentale - Brest, EA3882 - Laboratoire Universitaire de Biodiversité et Écologie Microbienne (LUBEM), ESIAB, Technopôle de Brest Iroise, 29280 Plouzané
2. Université de Bretagne Occidentale – Brest, UMR6539 - Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin (LEMAR), IUEM, Technopôle de Brest Iroise, 29280 Plouzané
3. IUT de Brest, Département Génie Biologique, 29238 Brest Cedex 3

* auteur pour correspondance : gaetan.lefloch@univ-brest.fr

Sections de rattachement : 68
Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ. *Serpula lacrymans* appelé « méréule » est le plus redouté des champignons lignivores responsables de la dégradation du bois mis en œuvre dans l'habitat. En effet, la présence de ce champignon n'est souvent détectée que très tardivement et parfois uniquement en cas de perte complète de résistance du bois, ce qui peut être la cause de l'effondrement du bâti. Une amélioration du diagnostic classique devient une urgence pour les professionnels de l'immobilier. Ce projet a pour objet d'évaluer le prélèvement d'air pour détecter de façon précoce les spores de *S. lacrymans* par PCR et cytométrie en flux. L'utilisation de ces techniques sur des dilutions de spores ainsi que sur des échantillons environnementaux a permis de déterminer les limites de détection de chacune d'entre elles. Cette étude a permis de montrer l'intérêt de la cytométrie en flux et de proposer des améliorations concernant la stratégie d'échantillonnage dans l'habitat.

MOTS-CLÉS : PCR quantitative, dHPLC, cytométrie en flux, champignons lignivores, *Serpula lacrymans*

Introduction

Dans l'air intérieur des bâtiments (logements, lieux de travail, de loisirs, écoles, crèches, etc....) se retrouvent des espèces fongiques cosmopolites dominantes qui sont souvent accompagnées de nombreuses espèces minoritaires généralement non identifiées. Cette flore fongique très diversifiée peut avoir pénétré dans les locaux par portes et fenêtres mais peut également se développer à l'intérieur même des bâtiments, favorisée par le type de matériaux utilisés dans la construction. Le développement des moisissures domestiques est fréquemment associé à une humidité souvent trop importante et une ventilation réduite. Ces dernières décennies, la diversité des champignons dans l'air intérieur s'est accrue due à une augmentation des défauts d'entretien des bâtis, à une utilisation excessive de moyens d'isolation.

Suite à des infiltrations d'eau et le transfert d'humidité dans les matériaux, le développement de certains champignons sur les matériaux de construction peut causer des dégâts importants. Lorsque les murs restent mouillés longtemps, des moisissures peuvent par exemple apparaître sur les matériaux de construction (plâtre, bois, ...) et l'envahir en profondeur. Si le bois mis en œuvre dans l'habitat contient plus de 20 % d'humidité, les champignons lignivores peuvent se développer dans le bois et s'attaquer à la lignine et à la cellulose du bois. Le développement des champignons lignivores est soumis à l'influence des facteurs environnementaux comme le type de matériaux, la température et l'humidité. Évidemment l'absence de composés inhibiteurs ou toxiques va également affecter le développement du champignon dans le bois et sa survie. Les champignons lignivores appartenant à la classe des Agaricomycètes sont majoritairement détectés dans les habitations ayant subi des inondations (Pitkäranta *et al.*, 2011). Ces champignons peuvent être responsables (avant ou après la coupe ou la mise en œuvre du bois) de différentes altérations : esthétiques, mécaniques ou les deux à la fois. Beaucoup de bois résineux et feuillus bleuissent lorsqu'ils restent exposés aux intempéries. Cette altération est uniquement esthétique et n'altère en rien les propriétés du bois attaqué. En revanche la pourriture fibreuse, la pourriture cubique, ou la pourriture molle, sont des altérations

mécaniques du bois causées par des champignons lignivores qui dégradent la lignine et/ou la cellulose du bois.

Dans le cadre du diagnostic des champignons lignivores, la compréhension des étapes de dissémination et d'infestation précoces est cruciale. Le diagnostic *in situ* est très difficile car les infestations sont souvent insidieuses et nécessitent une destruction de l'habillage des murs pour révéler la réelle ampleur des dégâts occasionnés. Plus rarement, les champignons sont bien visibles ou révélés lors de sondages destructeurs (figure 1), pourtant le diagnostic n'en est pas plus aisé car l'observation du champignon et/ou des symptômes sur les bois dégradés ne permettent pas de différencier les champignons. Depuis quelques années, le développement des outils moléculaires basé sur l'amplification par PCR a permis de mettre en évidence la faisabilité et la fiabilité du diagnostic moléculaire des champignons lignivores à partir d'échantillons prélevés dans des habitats infestés. Afin de permettre un diagnostic précoce des champignons lignivores lors des transactions immobilières, il est apparu nécessaire de valider les performances de la PCR-dHPLC sur des prélèvements d'air ambiants collectés dans des habitats infestés. Le choix du prélèvement d'air *in situ* se justifie pour les raisons suivantes : (i) la facilité de mise en œuvre grâce à des appareillages portatifs commercialisés, (ii) la dissémination des spores ou de débris de mycélium par l'air et (iii) le caractère non destructeur du prélèvement d'air par opposition aux prélèvements de matériaux de construction obtenus par sondages destructeurs. L'objectif de cette étude est d'évaluer le prélèvement d'air comme outil de diagnostic précoce sur différents sites supposés infestés. Les performances de trois systèmes de prélèvements d'air seront évaluées et leur analyse sera réalisée par PCR-dHPLC et par cytométrie en flux. Les résultats obtenus pour ces prélèvements d'air seront discutés et comparés aux observations sur sites et aux résultats obtenus par l'analyse de matériaux de constructions et de champignons prélevés sur les mêmes sites.

Matériels et méthodes

Habitats analysés

Lors de cette étude, des habitats infestés ou supposés infestés, ont servi de sites expérimentaux pour la détection de *S. lacrymans*. Ces sites ont été signalés par des experts immobiliers et notaires du département et sont listés dans la partie résultat (tableau VIII). Ils sont classés selon un indice d'infestation défini pour cette étude : cet indice permet de regrouper les habitats selon leur typologie et le niveau de risque de découverte de *S. lacrymans* sans sondage destructeur (tableau I).

Tableau I : Classification des habitats analysés dans cette étude.

Indice	Type d'habitat	Définition	Nombre d'habitats étudiés (n=17)
0	supposé sain	absence d'infestation visible	2
1	à risque	absence d'infestation visible mais forte suspicion (typologie de l'habitat)	7
2	réhabilité ou infesté (non actif)	symptômes de dégradation visibles mais attaque ancienne	6
3	infesté (actif)	symptômes de dégradation visibles et présence d'un sporophore et/ou du mycélium actif	2

La majorité des habitats analysés étaient des biens immobiliers en vente : ceci a eu pour conséquence un accès restreint et l'impossibilité de faire des prélèvements destructeurs.

Pour l'ensemble de ces habitats des prélèvements d'air ont été réalisés avec le Sampl'air (AES Chemunex). Cet appareil servira de référence dans cette étude. Les performances du Coriolis μ (Bertin Technologies) ont été évalués par comparaison au Sampl'air. Dans les habitats pour lesquels plusieurs pièces étaient susceptibles d'être infestées, les prélèvements ont été réalisés uniquement pour les pièces présentant des symptômes de dégradation par des champignons ou une forte hygrométrie ambiante. Pour chacune de ces pièces les prélèvements ont été réalisés en duplicats selon la méthodologie résumée dans le tableau II.

Type de prélèvement (appareil utilisé)	Volume d'air prélevé	Incubation / conservation	utilisation
impaction sur gélose (Sampl'air)	100 l	gélose placée à 20°C et 25°C	Identification macro- et microscopique
impaction sur filtre (Sampl'air)	100 l	conservation des filtres à -20°C	analyse moléculaire (PCR, PCRq, dHPLC)
collecte en milieu liquide (Coriolis μ)	300 l	conservation des flacons à +4°C et -20°C	analyse moléculaire (PCR, PCRq, dHPLC) analyse par cytométrie en flux

Tableau II : Méthodologie appliquée pour l'échantillonnage dans les habitats susceptibles d'être infestés par S. lacrymans.



Figure 1 : Illustrations des formes d'infestation et de dissémination de S. lacrymans : plafond entièrement dégradé par l'attaque fongique (A) sporophore prélevé dans un habitat (B) sporée de S. lacrymans (C) et spores observées en microscopie optique (Grossissement x400, spores 8-10 μ m)) (D).

Matériel fongique

Origine et entretien des souches fongiques

L'ensemble des expérimentations en laboratoire a été réalisé avec une souche de collection de *S. lacrymans* issue de la Collection de l'Université de Bretagne Occidentale (<http://www.univ-brest.fr/souchotheque> : UBOCC1.10.076). Cette souche a été isolée en 2010 dans une maison infestée et à déjà fait l'objet de travaux de caractérisation au sein du laboratoire (Maurice *et al.*, 2011). L'entretien de cette souche est réalisé par repiquage successif sur milieu gélosé (MEA, Difco), additionné ou non d'antibiotiques. Toutes les dilutions de

spores de *S. lacrymans* ont été réalisées à partir des spores prélevées dans une cave infestée à Brest (rue Victor Hugo). Les spores ont été conservées de façon indifférenciées à 4°C et à -20°C.

Obtention de gammes de suspensions de spores

Deux types de gammes de suspensions de spores ont été réalisées par dilutions successives: une série de dilution de spores *S. lacrymans* et une série de dilution de spores *S. lacrymans* en mélange avec deux autres espèces fongiques contaminantes: *Penicillium expansum* (UBOCC1.01.417), *Aspergillus niger* (UBOCC1.11.095). Pour chacune des dilutions, une estimation de la concentration est réalisée à la cellule de Malassez et est vérifiée par cytométrie en flux. Pour la gamme de dilution de spores de *S. lacrymans* seul : à partir d'une suspension de spores concentré à $\sim 2.10^8$ spores.ml⁻¹, une gamme de dilution allant de 1.10^8 (Sla1) jusqu'à $1,7.10^6$ (Sla6) spores.ml⁻¹ a été réalisée. Cette gamme de dilution servira par la suite de gamme standard en PCR quantitative. Pour la gamme de dilution de spores de *S. lacrymans* en mélange : des suspensions de spores (10^8 spores.ml⁻¹) de *Penicillium* sp. et d'*Aspergillus* sp. ont été obtenues à partir des cultures de 7 jours sur milieux gélosés (MEA). La suspension mère de la gamme de dilution correspond au mélange d'un volume égal de chaque suspension mère initiale. La concentration initiale en spores de *S. lacrymans* est de $\sim 2.10^8$. Nous avons fait une gamme de dilution allant de $8,2.10^5$ à $8,2.10^6$ spores.ml⁻¹.

Extraction d'ADN de souches de collection (mycélium et dilutions de spores)

L'extraction d'ADN génomique d'une culture de 7 jours de *S. lacrymans* a été réalisée à l'aide du kit Fast DNA Spin Kit for Soil (MP Biomedicals) en suivant le protocole recommandé par le fabricant pour les espèces fongiques. L'extraction d'ADN génomique des spores de *S. lacrymans* a été réalisée à l'aide du kit Fast DNA Spin Kit (MP Biomedicals) en suivant le protocole recommandé par le fabricant pour les cellules végétales. La principale différence réside dans l'utilisation

d'un tampon de lyse contenant une solution de précipitation des protéines (PPS).

Extraction d'ADN de spores impactées (sur filtres et en milieu liquide)

Afin d'évaluer l'efficacité de l'extraction sur des filtres en papier Whatman, 1 ml de chaque suspension de spores a été déposé sur des filtres d'un diamètre de 50 mm utilisés pour le prélèvement d'air (Sampl'air). Les deux protocoles utilisés pour l'extraction d'ADN génomique de souches fongiques pures, Fast DNA Spin Kit et Spin Kit for Soil, ont été utilisés comme décrit précédemment. Pour les spores impactées en milieu liquide (Coriolis μ), une concentration des spores a été réalisée par filtration sur membrane (VWR). Une fois la suspension liquide (10 ml) contenant les spores à concentrer filtrée, la membrane est recueillie stérilement pour être ensuite lavée avec 1 ml de tampon de lyse du kit d'extraction. Le facteur de concentration obtenu ainsi est de 10.

Amplification par PCR conventionnelle

La région ITS I de l'ADN ribosomique a été amplifiée en utilisant les couples d'amorces ITS1/ITS2 et ITS1/SlaR2 (tableau III). Ces deux couples permettent l'amplification de tous les champignons et de *S. lacrymans*, respectivement. Le mélange réactionnel (25 μ l) est composé de chaque amorce à la concentration finale de 200 nM, d'une solution de chaque dNTP à 200 μ M, de $MgCl_2$ (2 mM), de la Taq polymérase (Go Taq Flexi, 5U/100 μ l) et du tampon (1X). Les programmes d'amplification par PCR sont les suivants: (i) pour les amorces ITS1/ITS2: une dénaturation initiale de 5 minutes à 95°C, 30 cycles de 1 minute à 95°C, 1 minute à 60°C, 1 minute et 30 secondes à 72°C, et une extension finale de 7 minutes à 72°C; (ii) pour les amorces ITS1/SlaR2: une dénaturation initiale de 5 minutes à 95°C, 30 cycles de 30 secondes à 95°C, 30 secondes à 54,3°C, 1 minute et 30 secondes à 72°C, et une extension finale de 10 minutes à 72°C. Tous les produits d'amplification ont été conservés à +4°C jusqu'à leur utilisation.

Tableau III : Amorces utilisées pour l'amplification par PCR conventionnelle de l'ADN ribosomique des champignons contaminants de l'habitat (i.e. S. lacrymans).

Nom	Séquence (5'-3')	Référence
ITS1	TCC GTA GGT GAA CCT GCG G	White <i>et al.</i> , 1990
ITS2	GCT GCG TTC TTC ATCG ATG C	White <i>et al.</i> , 1990
Slar2	GAG GAG CCG ATG AAC AAG AG	Horisawa <i>et al.</i> , 2009

Amplification par PCR quantitative

Programme d'amplification par PCR quantitative

Les amorces listées dans le tableau IV ont été testées dans différentes conditions de PCR afin de déterminer leur température d'hybridation et leur concentration optimale. Dans un premier temps la gamme standard d'ADN a été réalisée avec une dilution de spores puis avec une gamme de dilution d'ADN mycélien. Les analyses en PCR quantitative sont réalisées sur l'appareil CFX96 (Biorad) en Eva Green dans les conditions suivantes: une dénaturation initiale de 5 minutes à 95°C, 40 cycles de 30 secondes à 95°C, de 30 secondes à 60°C, de 1 minute et 30 secondes à 72°C, et une extension finale de 7 minutes à 72°C suivie d'une courbe de dissociation.

Tableau IV : Amorces utilisées pour l'amplification en PCR quantitative de l'ADN ribosomique de S. lacrymans.

Nom	Séquence (5'-3')
SL_tub_F	TATCGGACACCGTTGTTGAA
SL_tub_R	CGTAAAGGGCCTCGTTATCA
SL_EF1_F	TGAAGCTGGAATCTCGAAGG
SL_EF1_R	GCTCCACTGGGTCATACGTT

Spécificité des amorces

La spécificité des amorces a été testée avec l'ADN extrait des souches de champignons lignivores le plus fréquemment rencontrés dans l'habitat. Certaines de ces souches sont très proches sur le plan génétique (appartenant au même genre i.e *Serpula himantoides* (UBOCC1.10.082) et d'autres sont génétiquement éloignées : *Trametes versicolor* (UBOCC1.10.102), *Coniophora puteana* (UBOCC1.10.077), *Donkiopora expansa* (UBOCC1.10.104), *Trichoderma harzianum* (UBOCC1.10.293), *Ulocladium alternariae* (UBOCC1.10.116), *Stachybotrys atra* (UBOCC1.01.177), *Alternaria alternata* (UBOCC1.10.222).

Analyse des produits d'amplification par dHPLC et séquençage des collectes

La dHPLC est une application de la méthode chromatographique classique (HPLC) à la séparation de l'ADN. Les produits d'amplification sont introduits dans la colonne de séparation thermorégulée (DNasep®) qui permet une dénaturation de l'ADN double brin. Pour l'analyse de nos produits d'amplification, 5 µl sont injectés dans la colonne à une température dénaturante de 50°C et un débit de 0,5 ml.min⁻¹ pour la circulation des solvants. La phase mobile est composée d'un mélange de TEAA (triéthylammonium acétate) et d'acétonitrile (ACN). Ces particules de TEAA vont ainsi attirer et fixer l'ADN chargé négativement à la phase stationnaire. Son élution est réalisée en faisant passer un gradient linéaire et croissant d'acétonitrile (Maurice *et al.*, 2011). L'appareil utilisé est un Wave® System (Transgenomic). Les processus d'injection puis de séparation des molécules d'ADN en fonction du gradient d'élution sont automatisés grâce au logiciel Navigator™ software (Transgenomic). Un détecteur de fluorescence et un détecteur UV couplés à la machine enregistrent les signaux en sortie de colonne. Des standards de taille propres au système sont injectés régulièrement afin d'assurer la fiabilité des résultats. Ils permettent de vérifier la résolution de la colonne ainsi que la calibration du four (marqueurs Wave Low Range Mutation Standard et Wave High Range Mutation Standard) et sa capacité à séparer les fragments en fonction de leur taille (marqueur

Wave DNA Sizing Control). Des lavages réguliers de la colonne avec de l'acétonitrile viennent compléter cet entretien.

Après séparation des produits d'amplification, les pics obtenus sont collectés manuellement (20 μl). Chacune de ces collectes est amplifiée de nouveau avec le même jeu d'amorce puis séquencée. Les produits d'amplifications sont séquencés par la société GATC (Köln, Allemagne). La concentration des produits PCR attendue pour le séquençage est de 20 $\text{ng} \cdot \mu\text{l}^{-1}$. La concentration utilisée pour les amorces est de : 10 $\text{pmol} \cdot \mu\text{l}^{-1}$.

Analyse des séquences

Pour chaque pic collecté, les séquences sens et antisens obtenues sont nettoyées manuellement et alignées selon l'algorithme Clustal W (Mega 5, Tamura *et al.*, 2011). Après obtention d'une séquence consensus avec le logiciel (Seaview, Version 4.3.5), les contigs sont confrontés à la base de données nucléotide (nt) du NCBI (National Center for Biotechnology Information). Pour déterminer le nom exact en vigueur au sein du règne fongique, la séquence la plus pertinente est choisie parmi les dix premiers résultats issus du BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) à l'aide d'un arbre phylogénétique obtenu par la méthode du Neighbour-Joining (paramètres par défaut du logiciel Mega 5).

Détection et quantification des spores de S. lacrymans par cytométrie en flux

Pour la quantification des spores de *S. lacrymans* en milieu liquide par cytométrie en flux, une suspension évaluée à 10^2 spores. ml^{-1} a été utilisée (estimation à la cellule de Malassez). L'appareil utilisé pour cette étude est un cytomètre en flux de type EasyCyte Plus (Guava-Millipore), équipé d'un laser bleu (488 nm). Les essais réalisés ont permis de déterminer les meilleurs réglages de l'appareil qui sont indiqués dans le tableau V.

Les réglages ont d'abord été réalisés sur des dilutions artificielles de spores permettant de sélectionner les cellules d'intérêt sur leurs caractéristiques de taille (détecteur FSC du cytomètre) et complexité

(détecteur SSC) puis des échantillons environnementaux prélevés à l'aide du Coriolis μ ont été testés. Sur ces échantillons qui présentent de très nombreux débris, un nouveau réglage de l'appareil a été effectué en ajoutant notamment un seuil sur le détecteur de fluorescence rouge (tableau V) afin d'éliminer de l'analyse le maximum de débris présentant une autofluorescence inférieure à celle observée pour les spores de *S. lacrymans*.

Dans l'objectif de déterminer le seuil de concentration des spores en suspension détectable par cytométrie en flux, des dilutions sériées (/2) ont été réalisées (5 réplicats par dilution) à partir d'une solution mère de spore de *S. lacrymans*, évaluée à 1.10^5 spores.ml⁻¹ et ont été dénombrées au cytomètre en flux. La limite de détection sera considérée comme atteinte quand le coefficient de variation du dénombrement sur les 5 répliquats d'une même dilution dépassera la valeur de 10% (valeur en dessous de laquelle le constructeur estime le dénombrement comme fiable).

Tableau V : réglages du cytomètre en flux optimisés pour la détection de spores de *S. lacrymans* pour des dilutions de spores et sur des échantillons environnementaux.

	Dilutions de spores sans marquage	Échantillons environnementaux (sans marquage)
Débit (µl.sec ⁻¹)	0,12	1,18
Durée d'acquisition (seconde)	60	60
Agitation (seconde)	High (3)	Medium (3)
Seuil de détection	paramètre FSC = 1	paramètre RED = 4
Détecteur	FSC gain 1 (100%) SSC : 250 V GRN : 653 V YLW : 519 V RED : 576 V	FSC gain 1 (100%) SSC : 250 V GRN : 653 V YLW : 519 V RED : 576 V

Note : FSC : forward scatter ; SSC: side scatter, GRN: détecteur fluorescence verte (525/30 nm) ; YLW: fluorescence jaune (583/26 nm) ; RED: fluorescence rouge (680/30 nm). V: volt ;

Résultats

Détection et identification de *S. lacrymans* dans l'habitat par des approches culturelles.

Isolement et purification des souches de S. lacrymans à partir de sporophores

Le dépôt direct d'échantillons environnementaux (matériaux, poussières, bois, ...) sur milieux gélosés non sélectifs ne permet pas d'isoler *S. lacrymans*. Les milieux gélosés étant rapidement envahis par des champignons appartenant aux genres *Penicillium* ou *Aspergillus*. L'utilisation de milieux sélectifs ne favorise que rarement la croissance du champignon lignivore et ces milieux ne sont plus utilisés en routine. L'isolement à partir de sporophore ou de mycélium frais est la seule méthode efficace pour obtenir une culture pure. Lors de cette étude un sporophore prélevé dans un habitat infesté (Plouarzel, tableau VIII) a permis l'isolement d'une souche de *S. lacrymans* (UBOCC1.12.114) qui est venue compléter la collection de souches de *S. lacrymans* existante au sein de la collection de l'UBO (26 souches).



Figure 2 : Exemples de prélèvements d'ambiances réalisés avec le Sampl'air sur géloses non sélectives MEA après 5 jours d'incubation à 27°C.

Évaluation d'un appareil de prélèvement d'air par impaction sur gélose

L'échantillonnage a été réalisé par impaction sur une surface gélosée sélective ou non sélective. Aucune différence significative entre les milieux sélectifs ou non sélectifs n'a été observée, malgré l'utilisation de conditions d'incubation optimales pour *S. lacrymans*. Les spores impactées se développent sur la gélose nutritive et forment des colonies ou thalles qui pourront être dénombrées et identifiées (figure 2).

Les cultures obtenues ont permis de mettre en évidence pour l'ensemble des sites analysés une prédominance de champignons ubiquitaires. Aucun des prélèvements d'air réalisé par cette méthode n'a permis de mettre en culture *S. lacrymans*. Les champignons isolés sur milieux sélectifs et non sélectifs, ont été identifiés sur critères morphologiques et sont classés par fréquence décroissante d'isolement : *Cladosporium* sp., *Penicillium* sp., *Fusarium* sp., *Aspergillus* sp., *Mucor* sp., *Epicoccum* sp.

Optimisation de l'extraction et de l'amplification d'ADN de spores par PCR conventionnelle

Avant de réaliser des extractions d'ADN de spores sur des prélèvements d'air, nous avons donc validé au préalable, le protocole d'extraction et d'amplification sur une souche pure de *S. lacrymans* (dilutions de spores : série Sla du tableau VIII). Pour se rapprocher des conditions réelles d'un prélèvement d'air, nous avons également testé les protocoles sur des dilutions de spores en mélanges (spores de *S. lacrymans* mélangées avec des pores de *Penicillium* sp. et d'*Aspergillus* sp.). Le seuil de détection de *S. lacrymans* en PCR est de 2.10^6 et 8.10^4 , pour les amorces universelles pour les amorces spécifiques, respectivement.

Tableau VI : Extractions et amplifications de l'ADNr pour une gamme de dilutions de spores de *S. lacrymans* seules (Sla) ou en mélange avec des spores d'*Aspergillus* et de *Penicillium* (SAP). Un produit d'amplification positif est symbolisé par un +, un signe – signale une absence d'amplification.

Dilutions			Extraction		Amplification			
n°	Nombre de spores de <i>S. lacrymans</i> .ml ⁻¹		Quantité d'ADN (ng.µl ⁻¹)		ITS1/2		ITS1/SlaR2	
	Sla	SAP	Sla	SAP	Sla	SAP	Sla	SAP
SM	2.10 ⁸	8.10 ⁶	5,9	3,7	+	++	+	++
1	1.10 ⁸	4.10 ⁶	6,3	4,5	++	+	++	++
2	4.10 ⁷	1,5.10 ⁶	6,6	6,4	++	+	++	+
3	2.10 ⁷	9.10 ⁵	13,0	3,7	++	+	++	+
4	1.10 ⁷	4.10 ⁵	4,9	0,8	+	+	+	+
5	2,8.10 ⁶	1,6.10 ⁵	5,3	1,5	+	-	+	+
6	1,7.10 ⁶	8,2.10 ⁴	7,0	1,8	-	-	-	+

Les résultats présentés dans le tableau VI montrent une inhibition de l'amplification avec les amorces universelles (ITS1/2) quand les spores sont en mélange pour la dilution Sla5 de *S. lacrymans*. Ce résultat n'est pas confirmé pour le couple d'amorces spécifique ITS1/SlaR2 défini par Horisawa *et al.* (2009) qui est utilisé dans notre étude.

Optimisation de l'extraction et de l'amplification en PCR quantitative

Détermination de la température d'hybridation des amorces

Deux gènes de ménages, EF-1 α (facteur d'élongation) et β -tubuline, ont été utilisés comme régions d'intérêt taxonomique. Pour chaque gène, nous avons défini deux couples d'amorces et une sonde (tableau IV) à l'aide du logiciel Primer 3 (v. 0.4.0) (Rozen et Skaletsky, 2000) grâce à un alignement de 25 séquences de *S. lacrymans* déposées dans la base de données nucléotides de NCBI. Les amorces ont été définies pour obtenir des produits d'amplification d'une taille d'environ 200 pb et d'une température d'hybridation identique. Une température optimale d'hybridation pour chacun des couples d'amorces a pu être mise en évidence par la réalisation de deux gradients de température. La température d'hybridation optimale des amorces correspond à 60°C.

Gammes standard

Deux types de gammes standard ont été réalisées dans notre étude : la première à l'aide de dilutions de spores et la seconde à l'aide d'ADN génomique extrait de mycélium. Il existe une relation linéaire entre la quantité de molécules d'ADN cibles à l'origine présentes dans un échantillon et le cycle seuil (Ct ou cycle threshold : nombre de cycles de PCR pour que la fluorescence de l'échantillon dépasse le bruit de fond) obtenu pour cet échantillon : cette relation linéaire est la base de la quantification. Les résultats d'amplification par PCR quantitative caractérisés par le cycle seuil de chaque suspension de spores ont montré un décalage, entre deux dilutions au 1/10^{ème}, supérieur aux 3 Ct théoriques (tableau VII). C'est pourquoi une nouvelle gamme étalon a été réalisée avec de l'ADN génomique. Pour cette nouvelle gamme, l'écart

entre deux dilutions au 1/10^{ème} est bien en conformité avec la valeur théorique.

Tableau VII : Détermination des cycles seuil (Ct) pour la gamme de dilution de spores. Certains Ct sont inférieurs à la limite de détection (LD). L'expérimentation a été répétée deux fois.

	ADN de spores (Ct moyen)	ADN mycélien (Ct moyen)
SlaSM	26,39 ± 0,07	16,26 ± 0,01
Sla1	27,56± 0,08	19,84 ± 0,10
Sla2	28,76± 0,04	22,69 ± 0,01
Sla3	31,5± 0,06	26,16 ± 0,06
Sla4	34,53± 0,25	29,61 ± 0,02
Sla5	36,87± 0,42	nd
Sla6	< LD	nd
Équation	Y = -6,03x+76	Y= -3,30x +29

Une seconde gamme de dilution avec de l'ADN extrait de mycélium a été réalisé et donne des résultats conformes aux valeurs théoriques attendues (tableau VII). La pente de la droite est bien de 3,30 : ce qui correspond a 3,3 Ct d'écart entre deux dilutions décimales. L'efficacité de la PCR est de 89,7 % et le coefficient de détermination est de 0,992 (figure 3).

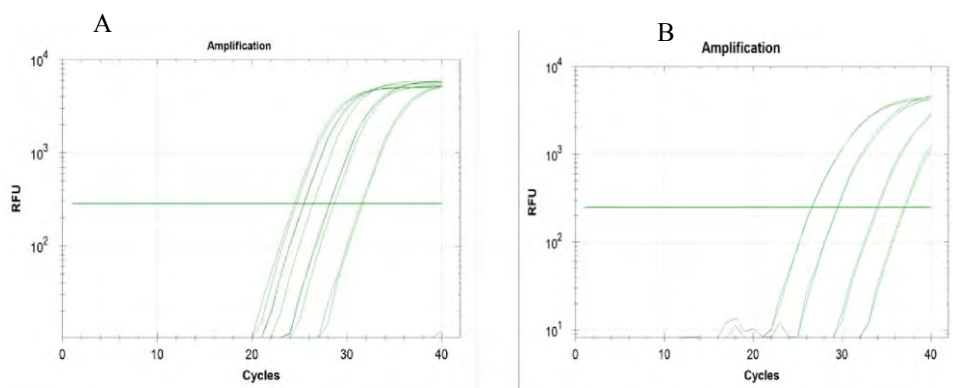


Figure 3 : comparaison des gammes standard réalisées à partir d'une dilution de spores et d'ADN génomique extrait de mycélium. Les courbes d'amplification par PCR expriment l'intensité de fluorescence (RFU), en fonction du nombre de cycle effectué. Avec une gamme étalon réalisée à partir de spores (A) et d'ADN génomique (B).

Validation de la spécificité des amorces

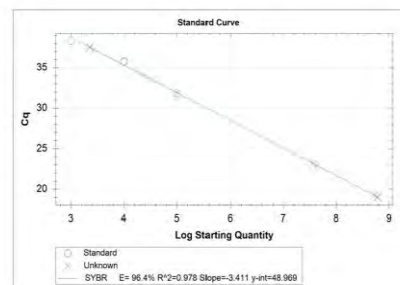
Chaque couple d'amorces défini pour cette étude a été testé pour sa spécificité avec des espèces fréquemment identifiées dans l'habitat. Aucune des souches testées, autre que *S. lacrymans*, n'a donné de résultat d'amplification positif (résultats non montrés). Nous pouvons conclure ainsi à une bonne spécificité de nos amorces à *S. lacrymans*.

Détection de S. lacrymans dans les habitats infestés par PCR conventionnelle et quantitative

Sur les 17 habitats analysés dans cette étude, seuls deux habitats ont donné une réponse positive à *S. lacrymans* par PCR quantitative (figure 4, tableau VIII). Ces deux habitats sont ceux situés à Locronan (indice 3) et à Plouarzel (indice 3). Aucun des prélèvements d'air réalisés à l'aide du Coriolis μ n'a donné de résultat positif sur ces mêmes échantillons. Un seul prélèvement sur filtre (Sampl'air) est positif après amplification par PCR conventionnelle (Plabennec).

Échantillons	Quantité d'ADN (ng.μl ⁻¹)
Locronan 1	3,38
Locronan 2	4,38
Plouarzel	7,59
Plouarzel (C)	8,76

A



B

Figure 4 : Quantification de l'ADN de S. lacrymans dans les échantillons environnementaux (A) et représentation des cycles seuil en fonction de la concentration initiale d'ADN (B). Les points de la gamme standard sont symbolisés par des ronds, les échantillons inconnus sont représentés par une croix.

Analyse des produits d'amplification par dHPLC.

L'intérêt de l'analyse par dHPLC des produits d'amplification obtenus en PCR conventionnelle est de pouvoir séparer ces produits en fonction de leur taille ou de leur composition en nucléotides selon la température appliquée à la colonne lors de la migration. Notre analyse est réalisée en conditions dénaturantes, nous séparons donc les produits d'amplification uniquement en fonction de leur taille. Dans un premier temps, l'analyse des produits d'amplification obtenus à partir des dilutions de spores (figure 5) a permis de révéler un pic majoritaire entre 12 et 13 minutes de rétention pour *S. lacrymans*. Malgré un dédoublement du pic, il est à noter une bonne reproductibilité des profils et des temps de rétention dans la colonne.

Figure 5 : chromatogrammes obtenus pour l'analyse dHPLC des produits d'amplification à partir d'une gamme de dilution de spores de S. lacrymans

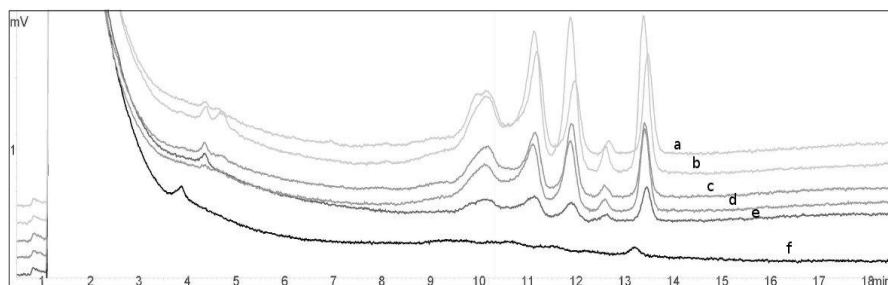
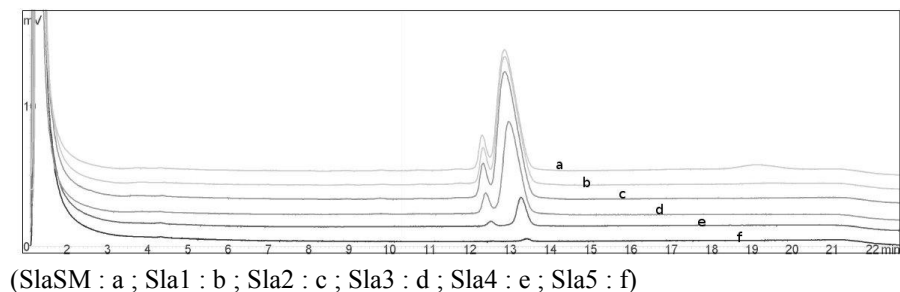


Figure 6 : chromatogrammes obtenus pour l'analyse dHPLC des produits d'amplification à partir de spores de S. lacrymans en mélange (SAP) avec des spores d'Aspergillus sp. et de Penicillium sp. (SAP1 : a ; SAP2 : b ; SAP3 : c ; SAP4 : d ; SAP5 : e ; SAP6 : f).

Les profils de communautés obtenus pour les solutions de spores en mélange montrent une bonne reproductibilité de la méthodologie avec 4 pics majoritaires entre 10 et 14 minutes de rétention. Il apparaît que la dHPLC permet une distinction des populations de spores des trois espèces testées : *S. lacrymans*, *Penicillium* sp. et *Aspergillus* sp. (figure 6).

Les résultats obtenus par cette même méthode pour les échantillons environnementaux montrent que certains prélèvements d'air sont positifs à *S. lacrymans* : ces échantillons sont ceux réalisés à Plabennec et à Locronan (figure 7 et tableau VIII). A Plabennec, le prélèvement a été réalisé avec le Sampl'air sur filtres et le niveau de contamination de l'habitat était très élevé (indice 3, carpophore et sporée visible). L'analyse du prélèvement d'air réalisé à Brest, rue J. Jaurès est négative malgré la présence d'un sporophore visible dans l'habitat.

Les autres résultats positifs en PCR-dHPLC ont été obtenus pour des prélèvements de sporophore ou de mycélium.

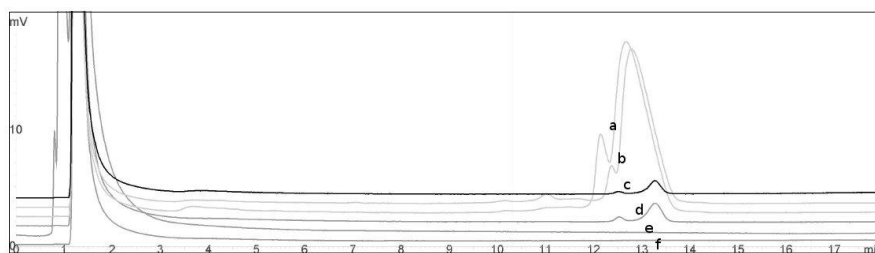


Figure 7 : chromatogrammes obtenus pour l'analyse dHPLC des produits d'amplification à partir de carpophores (J. Jaures : a, Plouarzel : b) et de prélèvements d'air (Plabennec : d ; Locronan : e,f) et comparaison aux profils obtenus pour des spores de S. lacrymans (c).

Identification des pics obtenus en dHPLC par séquençage

Les pics obtenus en dHPLC pour les échantillons positifs ont été collectés et séquencés afin de confirmer l'identification obtenue grâce au temps de rétention. Les résultats de séquençage montrent que nous avons correctement identifié *S. lacrymans* dans chacun des cas. La comparaison de la séquence obtenue avec les bases de données indique comme meilleur résultat une séquence de *Serpula lacrymans* (numéro d'accèsion de GenBank GI:374086082).

Détection et quantification de spores de S. lacrymans par cytométrie en flux

La population de spores se distingue *a priori* assez aisément des débris en taille et en structure (figure 8, cytogramme A). Il est cependant intéressant de noter que les spores présentent une autofluorescence dans tous les détecteurs (fluorescence verte, jaune et rouge). Cette particularité facilite la distinction des spores de *S. lacrymans* d'autres particules non autofluorescentes dans un mélange.

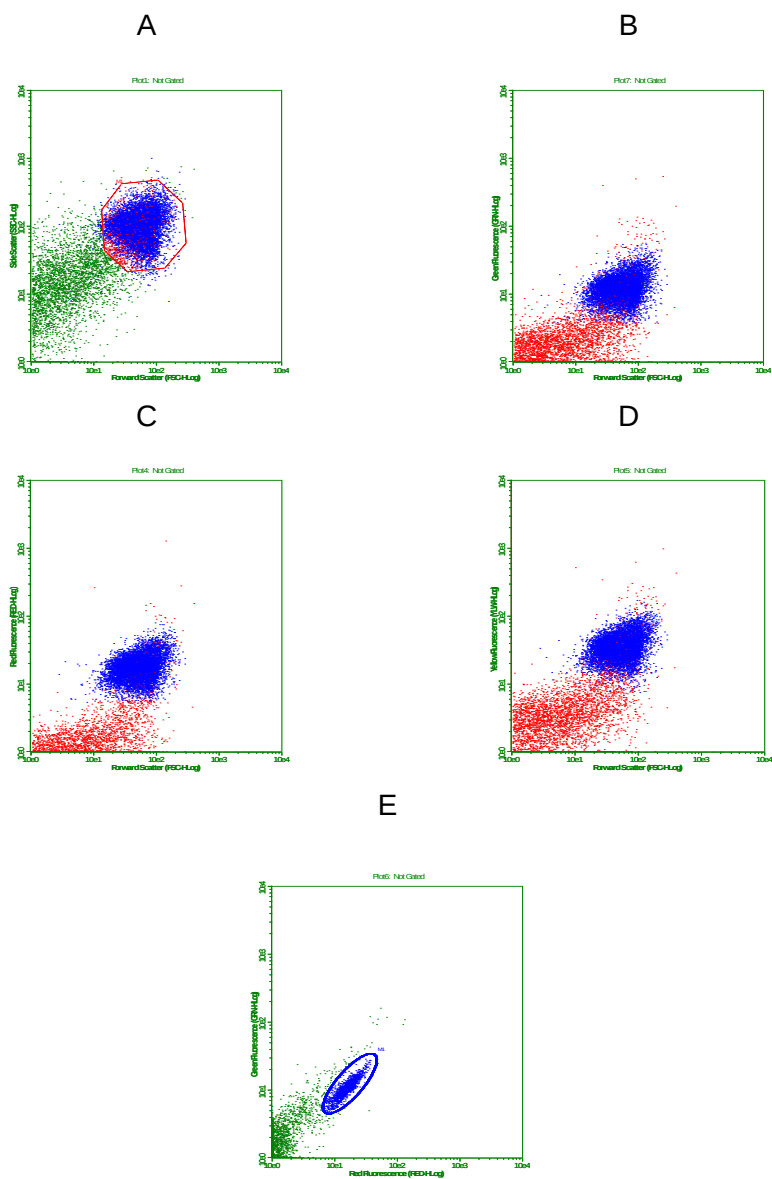


Figure 8 : cytogrammes représentant dans la région M1 les spores de *S. lacrymans* (points bleus) ; A : taille (forward scatter) en fonction de la

complexité (side scatter) ; B : fluorescence verte (green fluorescence) en fonction de la taille ; en C : fluorescence rouge (red fluorescence) en fonction de la taille ; D : fluorescence jaune (yellow fluorescence) en fonction de la taille. La sélection des spores de *S. lacrymans* est réalisée sur le cytogramme fluorescence verte en fonction de la fluorescence rouge (région M1, graphe E).

Cette observation amène à sélectionner les cellules d'intérêt sur la base de cette autofluorescence (fig. 8, E : fluorescence verte en fonction de la fluorescence rouge) plutôt que sur les seuls critères de taille et de structure, permettant, dans l'objectif d'un dénombrement précis, d'éliminer certains débris qui présenteraient des critères de taille et de structure identiques à ceux des spores mais sans autofluorescence.

Les résultats du test de détermination du seuil de concentration des spores en suspension, détectable par cytométrie en flux, montrent qu'à partir d'une concentration de ~ 190 spore par ml, le coefficient de variation devient incompatible avec la précision requise. Jusqu'à ~ 380 spores.ml⁻¹, le dénombrement moyen obtenu n'est pas significativement différent du dénombrement de la solution mère avec des coefficients de variation acceptables (3,9% à 11,8%).

En conclusion, le dénombrement des spores de *S. lacrymans* en solution à l'aide du cytomètre Guava EasyCyte plus peut être considéré comme convenable (à 10% prêt) jusqu'à une limite basse de l'ordre de 4.10^2 spores par ml.

Pour une analyse d'échantillons environnementaux (prélèvements d'air réalisés avec le Coriolis μ), le dénombrement d'événements type «spores de mэрule» donne une estimation de $8,5.10^2$ spores.ml⁻¹ pour l'échantillon réalisé à Locronan (duplicat n°2) et $1,1.10^2$ spores.ml⁻¹ pour le duplicat n°1. Cependant, même si la double sélection fluorescence verte/rouge et taille/structure permet d'éliminer une grande partie des débris, il est impossible de déterminer la fraction des concentrations estimées effectivement due à la présence de spores de *S. lacrymans*. Les valeurs obtenues sont en effet encore trop faibles pour en garantir la nature. Ces valeurs sont situées autour de la limite de détection de l'appareil déterminée dans le cadre de ce travail ($\sim 4.10^2$ spores par ml).

Tableau VIII : Synthèse des résultats obtenus par les différents outils testés dans cette étude pour la détection de S. lacrymans dans des habitats susceptibles d'être infestés. La nature des échantillons prélevés peut être selon les cas : du bois (B), du carpophore (C), du mycélium (M), des filtres (F) pour les prélèvements d'air du Sampl'air, et du liquide pour les prélèvements d'air du Coriolis μ (L).

Lieu	Indice	Appareil de prélèvement		Nature Échantillon	PCR classique		PCRq	dHPLC	Cytométrie
		Sampl'air	Coriolis μ		ITS 1/2	SluR2	EF1F/R		
Brest, rue Armorique	0	Oui	Oui	F	-	-	-	-	
				L	-	-	-	-	-
Brest, rue République	0	Oui	Oui	F	-	-	-	-	
				L	-	-	-	-	-
Brest, rue Gasté	0	Oui	Oui	F	-	-	-	-	
				L	-	-	-	-	-
Cast	1	Oui	Oui	F	-	-	-	-	
				L	-	-	-	-	-
Plabennec, entrée bourg	1	Oui	Oui	F	+	-	-	-	
				L	-	-	-	-	-
Landerneau	1	Oui	Non	B	+	-	-	-	
				F	-	-	-	-	-
Saint Renan	1	Oui	Non	B	-	-	-	-	
				F	-	-	-	-	-
Brest, 36 rue Massillon	1	Oui	Non	F	-	-	-	-	-
				B	+	+	-	-	
				C	+	+	-	-	
Brest, 38 rue Massillon	1	Oui	Non	F	-	-	-	-	-
				B	+	+	-	-	
				C	+	+	-	-	
Brest, rue des Remparts	2	Oui	Oui	F	-	-	-	-	-
				L	-	-	-	-	-
Plabennec, campagne	2	Oui	Oui	F	+	-	-	+	-
				L	+	-	-	-	-
				B	-	-	-	-	
Plouvien	2	Oui	Non	C	+	-	-	-	
				F	+	-	-	-	-
				B	+	+	-	-	
Roscoff	2	Oui	Oui	M	+	-	-	-	
				F	-	-	-	-	-
				L	-	-	-	-	-
Brest, rue Jean Jaures	2	Oui	Non	C	+	+	-	+	-
				F	+	-	-	-	-
Brest, rue Vauban	2	Oui	Oui	F	-	-	-	-	-
				L	-	-	-	-	-
Maël-Carhaix	3	Oui	Non	F	-	-	-	-	-
				C	+	-	-	-	
Plouarzel		Oui	Oui	C	+	+	+	+	-
				F	-	-	-	-	-
Locronan	3	Oui	Oui	L	-	-	-	-	+
				B	+	+	+	+	
				C	+	+	+	+	

Discussion

La certitude de l'identification de *S. lacrymans* nécessite au minimum l'observation d'un sporophore ou d'une sporée. La simple observation des symptômes sur bois (pourriture cubique) et du mycélium ne suffit pas au diagnostic d'une contamination par ce champignon lignivore. Celui-ci présente en début d'infestation un mycélium d'abord dense, à texture filamenteuse et blanc cotonneux. Plus tard, la couleur du mycélium tend vers le jaune puis devient grisâtre pour finalement prendre l'aspect d'un voile aérien quand les conditions deviennent défavorables à son développement (Watkinson et Eastwood, 2012). Dans le cas d'une infestation avec du mycélium uniquement, l'isolement et l'obtention d'une souche pure à partir de prélèvements sur site est nécessaire. Malheureusement, l'efficacité de cette approche est limitée par une croissance lente comparativement aux contaminants fongiques ubiquitaires de l'environnement. En effet, nos résultats confirment les résultats déjà obtenus par Pastuszka *et al.* (2000) qui ont montré que les habitats fortement infestés sont majoritairement infestés par les *Penicillium* (90 % des isolats). Ces résultats obtenus avec des appareils à impaction montrent les limites des méthodes culturales et l'intérêt de l'utilisation d'approches mettant en œuvre des outils moléculaires ou cultures-indépendantes. Pourtant, les approches culturales présentent un intérêt certain, en particulier pour la réalisation d'une collection qui représente une ressource biologique indispensable au développement de toute activité diagnostique ou de criblage de molécules fongicides.

Ainsi, les outils moléculaires basés sur l'amplification par PCR, peuvent apporter une plus-value importante dans l'identification des contaminants de l'habitat de culture difficile. Des études précédentes ont pu montrer l'intérêt et la pertinence de la PCR conventionnelle couplée à des outils analytiques tels que la CE-SSCP ou la dHPLC pour identifier les champignons lignivores (Maurice *et al.*, 2011, Pinheiro *et al.* 2013) à partir de prélèvements de matériaux ou de champignons. Pour le

diagnostic spécifique de *S. lacrymans* nous avons montré que l'utilisation d'amorces spécifiques en PCR conventionnelle et en PCR quantitative donne de bons résultats sur des échantillons environnementaux (bois, mycélium, poussières). Même si un problème de compétition pour la fixation des amorces universelles sur l'ADN cible a été mis en lumière, l'utilisation conjointe des deux jeux d'amorces en PCR conventionnelle peut être une remédiation efficace. Si l'amplification par les amorces spécifiques de *S. lacrymans* est négative, l'amplification par le jeu d'amorces universelles permettra d'identifier le champignon responsable de l'infestation par séquençage.

Il est généralement admis que les spores sont la principale source de dissémination des champignons responsables des pourritures du bois (Wälchli et Raschle, 1983). Dans cette étude, nous cherchions à détecter une infestation précoce de *S. lacrymans* à partir d'échantillons prélevés dans des habitats supposés infestés. Nous avons montré sur des suspensions de spores artificielles et sur des prélèvements d'air que le seuil de détection des spores de *S. lacrymans* est très élevé par une approche en PCR. Pour remédier à ce problème et pour abaisser le seuil de détection, nous avons donc utilisé une approche de dénombrement et d'identification par cytométrie en flux. La méthodologie employée a permis de réduire le seuil de détection des spores de *S. lacrymans* de façon significative. Pourtant, quelle que soit la méthode employée (PCR ou cytométrie), le prélèvement d'air (300 l) n'est pas suffisant pour mettre en évidence la présence de spores de *S. lacrymans* dans des habitats infestés et en particulier en l'absence de sporophore visible. Malgré la profusion de spores disséminées par ce champignon, il semble que le nombre de spores non nucléées (25%) et la sédimentation des spores dans l'habitat n'aient pas permis la détection précoce de *S. lacrymans* par prélèvement d'air ponctuel. Pour détecter les spores de *S. lacrymans* en cytométrie en flux avec une incertitude acceptable, il serait nécessaire d'augmenter la concentration de spores dans les prélèvements d'air. En guise d'amélioration, l'une des pistes envisagée, serait donc d'augmenter la durée de prélèvement afin d'obtenir une suspension de spores plus concentrée.

Conclusion et perspectives

Malgré l'impossibilité de détecter *S. lacrymans* de façon précoce par prélèvement d'air, cette étude nous a permis de progresser sur le développement méthodologique pour le diagnostic des champignons contaminants de l'habitat. Ainsi, dans le cadre du diagnostic des champignons lignivores, l'utilisation du Sampl'air est à éviter, du fait d'une culture très lente des champignons d'intérêt par rapport aux contaminants ubiquistes. Un prélèvement de poussières par aspiration d'air dans des zones confinées difficiles d'accès pourrait dans certains cas présenter un intérêt. Certains professionnels envisagent le suivi de chantier de rénovation par prélèvement d'air et de poussières derrière les cloisonnements afin d'écarter le risque de ré-infestation sur la durée de la garantie décennale.

Enfin, les résultats de notre étude montrent que dans des habitats fortement contaminés par *S. lacrymans*, l'utilisation du Coriolis μ est à privilégier pour réaliser le prélèvement d'air. En effet, ce système de prélèvement permet une impaction des spores dans un liquide et permet soit une amplification directe par PCR soit un couplage avec la cytométrie en flux et un dénombrement des cellules en suspension. Le couplage de la cytométrie en flux au prélèvement d'air (Coriolis μ) n'avait jamais été réalisé à ce jour et offre des perspectives prometteuses dans le cadre de la détection de contaminants fongiques dans l'air intérieur.

Pour appréhender le risque représenté par la contamination fongique des environnements intérieurs, la détection, l'identification et la quantification des champignons présents sont indispensables. En effet, les moisissures peuvent, à forte dose pour des personnes bien portantes ou même à faible concentration pour des personnes immuno-déficientes, soit entraîner des infections, soit des réactions allergiques et/ou inflammatoires relevant, le plus souvent de pathologies respiratoires aiguës. L'exposition aux particules et aux métabolites fongiques se fait principalement par inhalation ou par ingestion mais aussi plus rarement par contact cutané. Ces dernières années, de plus en plus d'études en Amérique du Nord et en Europe ont fait ressortir un lien possible entre la présence de champignons en milieu intérieur et diverses atteintes à la santé (Harrison *et al.*, 1992). Il existe peu de données concernant la

prévalence de l'exposition aux moisissures en milieu intérieur, notamment en raison des difficultés inhérentes à la standardisation de l'échantillonnage dans l'environnement intérieur. C'est pourquoi, l'US-EPA (United States Environmental Protection Agency), qui propose une approche méthodologique basée sur la PCR quantitative pour la détection des principales moisissures rencontrées dans l'habitat (*Aspergillus*, *Stachybotrys*, *Penicillium* et *Paecilomyces* (Haugland *et al.*, 1999 ; 2004)) utilise un système d'aspiration de la poussière dans les principales pièces de vie.

Il s'agit d'une analyse globale et quantitative des espèces fongiques détectées après aspiration des poussières dans l'habitat qui permet de déterminer un indice de biodiversité fongique (indice relatif de moisissure de l'environnement, Environmental Relative Moldiness Index, ERMI) et offre aux experts immobiliers un outil supplémentaire aux diagnostics visuels classiques (Vesper *et al.*, 2007). Toutefois, cette méthode nécessite l'utilisation d'amorces spécifiques qui doivent être conçues pour chaque espèce ou genre ciblés, ce qui impose le développement de plusieurs tests pour une analyse globale. Cette limite de la PCR quantitative pourrait être contournée par l'utilisation de la PCR-DHPLC.

Remerciements

Nous tenons à remercier E. Ledey (Aadena, Saint renan) et L. Miller (Adexim, Brest) pour la recherche des habitats infestés et leurs expertises. Cette étude a été financée par la Région Bretagne et les fonds FEDER.

Bibliographie

Boutin-Forzano S, Moreau D, Kalaboka S, Gay E, Bonnefoy X, Carrozzi L, Viegi G, Charpin D, Annesi-Maesano I, 2007 Reported prevalence and comorbidity of asthma, chronic bronchitis and emphysema: a pan-European estimation. *Int J Tuberc Lung Dis.* 11(6):695-702.

Carl CG, Highley TL, 1999 Decay of wood and wood-based products above ground in buildings. *J Test Eval.* 27(2):150-158

Choi SM, Ruddick JNR, Morris PI, 2001 The effect of storage and subculturing on in vitro fruit body formation and spore production in *Gloeophyllum sepiarium* and *Oligoporus placentus*. Inter. Res. Group on Wood Preservation (IRG), Stockholm, Sweden. IRG/WP/01-20232. 11 pp.

Harrison JC, Pickering A, Faragher EB, Austwick PK, Little SA, Lawton L, 1992 An investigation of the relationship between microbial and particulate indoor air pollution and the sick building syndrome. *Respiratory Medicine*. 86: 225-235.

Haugland RA, Heckman JL, Wymer LJ, 1999 Evaluation of different methods for the extraction of DNA from fungal conidia by quantitative competitive PCR analysis. *J Microbiol Methods*. 37(2):165-176.

Haugland RA, Varma M, Wymer LJ, Vesper SJ, 2004 Quantitative PCR analysis of selected *Aspergillus*, *Penicillium* and *Paecilomyces* species. *Syst Appl Microbiol*. 27(2):198- 210.

Horisawa S, Sakuma Y, Doi S, 2009 Qualitative and quantitative PCR methods using species-specific primer for detection and identification of wood rot fungi. *J. Wood Sci*. 55:133–138.

Maurice S, Le Floch G, Le Bras-Quéré M, Barbier G. 2011 Improved molecular methods to characterise *Serpula lacrymans* and other Basidiomycetes involved in wood decay. *J Microbiol Methods*. 84(2): 208-215.

Pastuszka J, Tha-Paw UK, Lis DO, Wlazlo A, Ulfig K, 2000 Bacterial and fungal aerosol in indoor environment in Upper Silesia, Poland. *Atmospheric Environment*, 34:3833 – 3842.

Pinheiro AC, Oliveira BP, Veríssimo C, Brandão JC, Rosado L, Jurado V, Macedo MF, 2013 Identification of a fungal community on gilded wood carved heritage. *J of Cultural Heritage*. 14(1) : 76–81

Pitkäranta M, Meklin T, Hyvärinen A, Nevalainen A, Paulin L, Auvinen P, Lignell U, Rintala H. 2011 Molecular profiling of fungal communities in moisture damaged buildings before and after remediation-a comparison of culture-dependent and culture-independent methods. *BMC Microbiol*. 21:11-235.

Rozen S, Skaletsky H, 2000 Primer3 on the WWW for general users and for biologist programmers. *Methods Mol Biol*. 132:365-386.

Tamura K, Peterson D, Peterson N, Stecher G, Nei M, Kumar S, 2011 MEGA5: Molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood,

evolutionary distance and maximum parsimony methods. Mol Biol Evol. 28: 2731-2739.

Vesper SJ, McKinstry C, Haugland R, Wymer L, Bradham K, Ashley P, Cox D, Dewalt G, Friedman W, 2007 Development of an environmental relative moldiness index for US homes. J Occup Environ Med. 49:829-833.

Wälchli O, Raschile P 1983 The dry rot fungus – experience on causes and effects of its occurrence in Switzerland. In: Oxley, TA, Barry, S eds. Biodeterioration 5. J Wiley, Chichesterpp. 749p

Watkinson SC, Eastwood DC, 2012 *Serpula lacrymans*, wood and buildings. Adv Appl Microbiol. 78 : 121-149.

White TJ, Bruns T, Lee S, Taylor JW, 1990 Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. pp. 315-322 In: PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications, eds. Innis, Gelfand, Sninsky and White. Academic Press, Inc., New York.

Wilcox WW, Dietz M, 1997 Fungi causing above-ground wood decay in structures in California. Wood Fiber Sci. 29:291-298.

Mini CV et photo de tous les auteurs



Dr. Gaétan LE FLOCH

Université de Bretagne Occidentale, IUT de Brest.
Depuis 2005, enseignant-chercheur en Microbiologie au
Département de Génie Biologique de l'IUT de Brest et au
Laboratoire Universitaire de Biodiversité et Écologie
Microbienne (LUBEM, EA3882).

Mon activité de recherche est en lien avec la description
d'écosystèmes à composantes fongiques et en particulier
sur des thématiques environnementales (*i.e.* sol,
rhizosphère, bois ...).



Dr. Christophe LAMBERT

Université de Bretagne Occidentale, Institut Universitaire
Européen de la Mer (IUEM)

Entre 2000 et 2010 : Chargé de recherche et
d'enseignement.

Depuis 2010 : Ingénieur de Recherche CNRS au
Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin
(LEMAR, UMR6539). Je suis responsable de la plateforme
de cytométrie en flux et j'interviens sur les thématiques
suivantes: Ecophysiologie des mollusques, Ecophysiologie
des algues toxiques, Biologie cellulaire, Microbiologie.



Pr. Georges BARBIER
Vice Président de la Valorisation de la Recherche à
l'Université de Bretagne Occidentale et Directeur du
Laboratoire Universitaire de Biodiversité et d'Ecologie
Microbienne (LUBEM, EA3882)



Charlotte LAOT
Assistante Ingénieur contractuelle. Diplômée de l'IUT de
Brest en 2008.

Modélisation d'une batterie Li-Ion pour véhicules électriques

Lucas Cicero*, HarryRamenah*, Camel Tanougast*, Philippe Jean*, Pierre Milhas et Abbas Dandache***

** Laboratoire LCOMS, équipe ASEC, Université de Lorraine
7 rue Marconi, 57070 Metz*

*** Nobel Plastiques
ZI de Marolles
51361 Vitry le François Cedex*

{lucas.cicero, harry.ramenah, camel.tanougast}@univ-lorraine.fr

Sections de rattachement : 63

Secteur : Secondaire / Tertiaire : 61

RÉSUMÉ. Le principal problème lié à l'essor des véhicules électrique est l'autonomie. Afin d'augmenter au mieux cette dernière, une gestion optimale des batteries est nécessaire. Du fait de sa forte énergie spécifique, la technologie des accumulateurs de type Lithium ion (Li-Ion) suscite un grand intérêt comme source d'énergie pour véhicules électriques. En particulier, l'étude de l'autonomie et de la durée de vie possible à partir d'une gestion efficace de batteries à base de cette technologie. Dans cet article nous proposons un modèle électro-thermique d'un accumulateur Li-Ion dont les paramètres électriques et thermiques sont extraits expérimentalement. Les bancs expérimentaux associés à cette caractérisation sont également détaillés.

MOTS-CLÉS : Modélisation électro-thermique, batterie Lithium-Ion, Capacité, états de charge-décharge, instrumentation, virtuelle.

1. Introduction

Le réchauffement climatique est devenu un problème sociétal dont l'importance ne cesse de croître. Ce phénomène est lié à l'émission de gaz à effet de serre, notamment l'émission de dioxyde de carbone, dont l'une des principales sources est les transports. Face à ce problème, plusieurs solutions ont été adoptées :

- Adoption de nouvelles législations
- Perfectionnement de la mécanique et des rendements
- Changement des énergies des véhicules

C'est dans ce contexte que le véhicule électrique voit son développement croître, mais dont la progression est limitée par leur autonomie. En effet, l'autonomie d'un véhicule électrique est étroitement liée à la capacité des accumulateurs utilisés. Cette capacité est exprimée en ampère-heure (Ah), courant pouvant être fourni pendant une heure, avant que l'accumulateur soit déchargé.

Actuellement, la technologie dominante des véhicules électriques est le Lithium Ion (*Li-Ion*) du fait de sa forte énergie spécifique (exprimée en Wh/kg). La Figure 1 illustre la structure d'un élément *Li-Ion*, relativement similaire à d'autres types d'accumulateurs, composée deux électrodes (anode et cathode), un électrolyte et un séparateur. C'est ce dernier élément qui fait la grande différence avec les autres technologies d'accumulateurs. Ce séparateur a uniquement pour but d'éviter tout contact entre l'anode et la cathode. L'électrolyte utilisé doit être un bon conducteur ionique. Les matériaux utilisés pour les électrodes sont des matériaux d'insertion dont la caractéristique principale est de pouvoir insérer ou désinsérer des ions Li^+ de manière réversible. Généralement, l'anode est constituée de graphite et la cathode est faite d'oxyde de métal (*Lithium Cobalt Oxide*, *Lithium Manganese Oxide*, *Lithium Fer Phosphate*, *Lithium Nickel Manganese*, etc.) qui va caractériser l'accumulateur. Le principe de fonctionnement de l'accumulateur est le suivant : lorsqu'une décharge s'opère aux bornes de l'accumulateur, un courant existe entre les deux électrodes, faisant transiter les électrons de la cathode vers l'anode correspondant à une oxydation au niveau de l'anode et à une réduction au niveau de la cathode. Pour maintenir un équilibre, un ion lithium transite de l'anode vers la cathode à travers

l'électrolyte. Lorsque d'une charge s'opère, l'effet inverse se produit (perte d'un électron au niveau de la cathode et gain d'électron à l'anode).

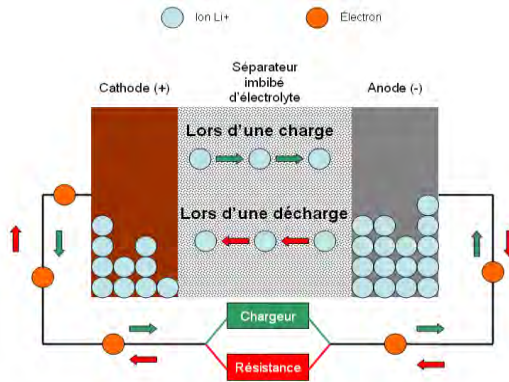


Figure 1. Structure d'un accumulateur Li-Ion Banc.

L'étude du comportement électrique, thermique ainsi de l'évolution de la capacité, qui diffèrent selon la température, d'une batterie *Li-Ion* est donc fondamentale pour permettre l'optimisation de son utilisation dans un contexte de source d'énergie des véhicules électriques. Bien que de nombreux paramètres soient fournis par les fabricants des accumulateurs de type *Li-Ion* (Résistance interne, tension de fin de charge/décharge, capacité, etc.), un grand nombre de paramètres ou caractéristiques électriques et thermiques supplémentaires sont nécessaires et peuvent être obtenus par des mesures complémentaires. En effet, dans le but d'anticiper et d'optimiser la durée de vie des accumulateurs, une caractérisation électro-thermique comportementale précise et exhaustive des accumulateurs est nécessaire.

Cet article propose une modélisation d'un accumulateur de type *Li-Ion* à partir d'une identification détaillée des principaux paramètres électriques et thermiques couplés, à extraire expérimentalement.

La suite de l'article est organisée de la manière suivante : la deuxième section détaille la caractérisation électrique et le modèle considéré d'un accumulateur *Li-Ion*. Le banc expérimental associé pour une extraction rapide des paramètres électriques est également présenté dans cette partie. La troisième section décrit le modèle thermique et les paramètres associés

d'un accumulateur *Li-Ion*. Cette section détaille l'extraction de ces paramètres à partir d'un banc spécifique de mesures. La quatrième section conclut et présente les perspectives de poursuite de ces travaux.

2. Modélisation électrique

Bien que plusieurs modèles électriques d'un accumulateurs *Li-Ion* soient proposés dans la littérature [(Barsali et al. 2002) (Benini et Al 2001)(Chen et al. 2006) (Gao et al. 2002) (Benini et Al 2001)], la plupart d'entre eux présente un modèle de comportement non-exhaustif d'un accumulateur *Li-Ion*. Il résulte de ces modèles une précision plus ou moins grande du comportement d'une batterie à base d'accumulateurs *Li-Ion*.

Nous proposons un modèle de comportement exhaustif d'un accumulateur *Li-Ion* à partir de ses principaux paramètres caractéristiques mesurables expérimentalement. Parmi ces paramètres caractéristiques, nous trouvons en pratique la tension d'élément qui est propre à la technologie de l'accumulateur. A capacité équivalente, un accumulateur possédant une tension plus élevée permettra d'obtenir une énergie spécifique plus importante. Nous distinguons deux types de tension, la tension en charge et la tension à vide. La tension en charge correspond à la tension mesurée lorsqu'un courant est débité par l'accumulateur. La tension à vide est la tension mesurée lorsque le courant débité = 0A et qu'une longue période de repos a été observée. L'évolution globale de la tension à charge ou à vide est propre à chaque technologie de batterie. La détermination de la tension à vide (noté *OCV – Open Circuit Voltage*) présente plusieurs intérêts, notamment pour permettre d'une part d'établir un modèle exhaustif de l'évolution comportementale du fonctionnement au cours du temps d'un accumulateur ; d'autre part, de déterminer l'état de charge d'un accumulateur. En effet, la tension à vide est liée à l'état de charge d'une batterie. La mesure de cette tension permet alors de connaître la capacité restante que peut fournir un accumulateur.

Cette section résume donc les paramètres mesurables les plus importants permettant d'aboutir à un modèle de comportement précis d'un accumulateur *Li-Ion* en état de charge ou décharge, selon son état et sa capacité de charge. Pour ce faire, nous proposons un banc d'instrumentation et les procédures permettant de mesurer ces paramètres,

mais également de caractériser rapidement (à un temps réduit) la tension à vide d'une batterie de type Lithium ion. Les résultats expérimentaux de mesure sont également détaillés.

2.1. Mesure de la Capacité d'une cellule Li-Ion

La capacité d'un accumulateur est le paramètre correspondant à la quantité d'énergie que peut stocker l'accumulateur. Cette capacité est exprimée en Ampère-heure (Ah). Par exemple, un accumulateur de capacité de 10 Ah fournit un courant de 10A pour une durée d'une heure, ou bien de 5 A pour une durée de 2 heures, etc. avant d'être totalement déchargé. Usuellement, on exprime cette capacité par l'équation suivante :

$$Capacité\ énergétique = \int_0^t intensité(t).dt$$

[1]

La mesure de la capacité s'obtient donc à partir d'une mesure de décharge de l'accumulateur à courant constant et au cours de la laquelle le courant et le temps sont relevés. La Figure 2 illustre le schéma synoptique du banc d'instrumentation développé pour l'ensemble des mesures des paramètres électriques dont la capacité d'un accumulateur *Li-Ion*.

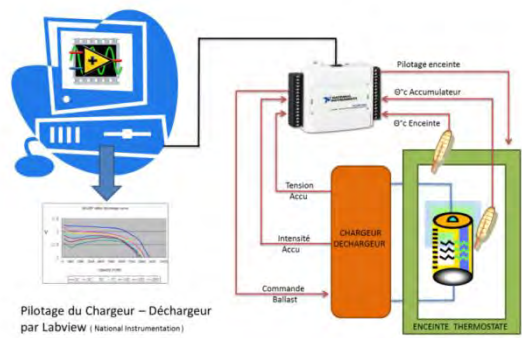


Figure 2. Synoptique d'un Banc d'instrumentation de mesure des paramètres électriques d'un accumulateur *Li-Ion*.

Le banc proposé est composé d'une interface d'acquisition National Instrument *USB-6008*, d'une enceinte climatique programmable via un port série *RS-232*, d'une interface logicielle d'instrumentation virtuelle *LabView* de mesures tension-courant et d'un chargeur-déchargeur d'accumulateur spécifique (Cicero et al. 2013). Ce banc permet une automatisation des mesures.

L'acquisition des mesures tension-courant s'effectuant par une interface virtuelle selon une fréquence d'acquisition ou d'échantillonnage, une méthode d'intégration par trapèze selon l'équation [1] en fonction de la période d'échantillonnage permet une bonne précision de la mesure de la capacité. En pratique, les consignes sont saisies via l'interface virtuelle *LabView* qui assure une régulation en courant ou en tension, en fonction de l'état de charge de l'accumulateur. Un signal pilote alors le chargeur-déchargeur pour la génération de forts courants aux bornes de l'accumulateur et permettant sa charge ou sa décharge.

La capacité d'une cellule *Li-Ion* est dépendante de deux paramètres extrinsèques que sont le courant délivré par la cellule et la température de la cellule. C'est pourquoi, comme illustré dans la Figure 2, l'accumulateur en essai est également placé dans une enceinte climatique. En effet, dans le cas du comportement d'un accumulateur d'un véhicule électrique, l'espace confiné et les forts courants demandés génèrent un stress électrique ayant pour résultat un échauffement de la cellule. Cet échauffement engendre à la fois une augmentation de la capacité énergétique de la cellule, mais également une réduction de sa durée de vie. Il s'agit donc de trouver le meilleur compromis en la température et le niveau de sollicitation en courant d'un accumulateur. Ainsi, la mesure de la capacité d'un accumulateur *Li-Ion* est fondamentale pour son étude comportementale dans un contexte de véhicule électrique.

La Figure 3 donne un exemple de résultats de mesure de la capacité d'un accumulateur de type *AWT 38120* de marque *Accuwatt* possédant une capacité de 10Ah.

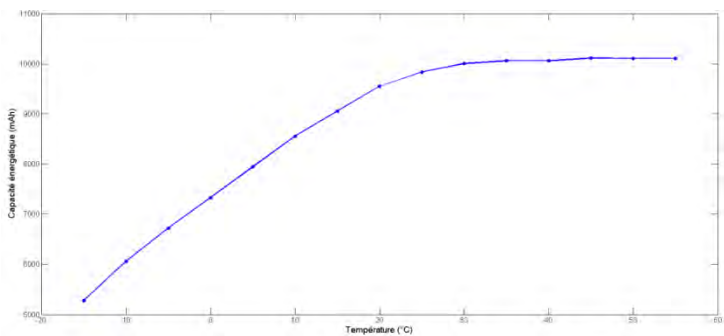


Figure 3. Mesure de la capacité en fonction de la température d'une cellule Li-Ion de type Accuwatt -AWT 38120 de 10Ah.

2.2. Mesure de la Tension à vide

La modélisation de batterie nécessite la prise en compte de la tension à vide (Cicero et al. 2013). Cette tension à vide est la tension d'équilibre de l'accumulateur. Plus précisément, il s'agit de la tension aux bornes de l'accumulateur lorsque celui-ci n'a aucune charge connectée et après une longue période de repos. Dans le cas de la technologie Lithium-Ion, cette tension à vide varie énormément en fonction de son état de charge, c'est-à-dire en fonction de l'énergie que peut encore fournir l'accumulateur. Généralement, la procédure de mesure de ce paramètre repose sur des cycles de décharge progressive de la batterie par palier de 5% et de repos de durée 1h afin d'obtenir la valeur réelle de la tension à vide (Abu-Sharkh et al. 2004). Cette procédure s'effectue avec une charge initiale de 100% (batterie totalement chargée) jusqu'à une charge à 0% (batterie totalement déchargée). Nous proposons une solution de mesure à temps réduit et dont la procédure repose sur des pauses d'une durée d'une minute dans les cycles de charge/décharge. La Figure 4 présente les résultats de mesure obtenus à partir du banc d'instrumentation proposé et après un cycle complet d'une charge et d'une décharge d'un accumulateur de type Accuwatt-AWT 38120 de 10Ah. Pour ces mesures, un ajustement des pauses en charge et en décharge est effectué (courbes en pointillés). Pour déterminer la tension à vide, une moyenne est réalisée entre ces deux courbes (courbe rouge). Cette technique permet un gain de temps, puisque la mesure de ce paramètre s'obtient avec une durée de mesure de 3h comparé à 29h avec la méthode standard.

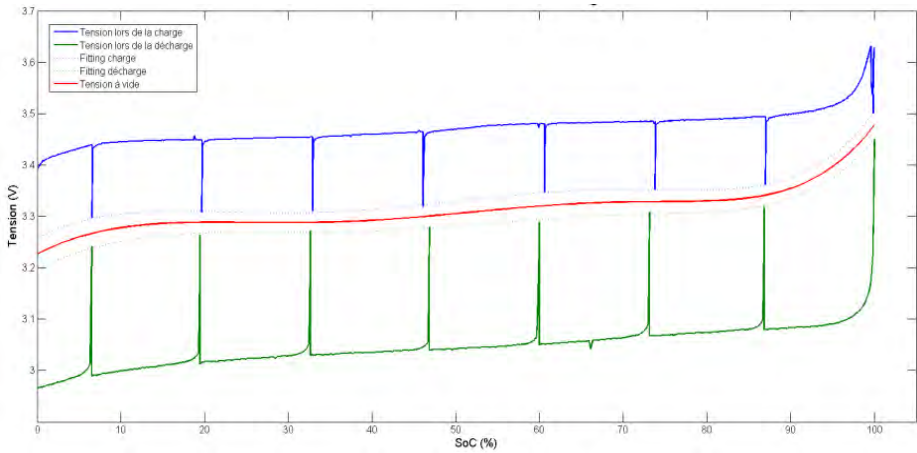


Figure 4. Détermination de la tension à vide obtenue par méthode rapide (courbe rouge) d'une cellule Li-Ion de type Accuwatt -AWT 38120de 10Ah. Les courbes verte et bleue sont les courbes relevées.

2.3. Mesure des Paramètres internes

Le comportement électrique d'une batterie dépend de son architecture interne. En effet, les différents éléments, en l'occurrence les électrodes séparées par l'électrolyte, vont créer un effet de couplage résistif – capacitif, générant une chute de tension lors des appels de courant (voir Figure 5).

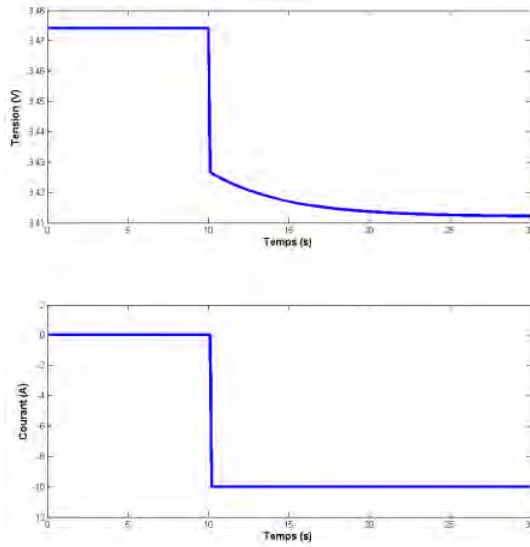


Figure 5. Mesure de l'effet de couplage résistif-capacitif. Réponses en tension et en courant d'un accumulateur Li-Ion pour un échelon de courant.

Ce comportement peut être modélisé suivant un couple résistance-condensateur ($R_{ts} // C_{ts}$) en série avec une résistance R_s (désignés composants de surtension) selon la structure de la Figure 6. La résistance R_s précédemment citée engendre la chute de tension directe (front net sur la Figure 5), tandis que R_{ts} et C_{ts} créent l'évolution exponentielle de cette tension.

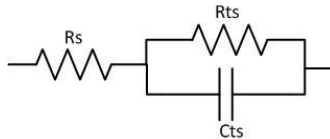


Figure 6. Résistances et condensateurs de surtension modélisant l'effet de couplage résistif-capacitif de la réponse d'un accumulateur Li-Ion.

La technique permettant d’extraire ces paramètres est détaillée dans (Schweighofer et al. 2002). Les valeurs obtenues dépendent de l’état de charge de l’accumulateur et de la température. A partir du banc d'instrumentation proposé, la capacité en charge et en décharge à différentes températures est déterminée. La Figure 7 donne les résultats de mesure obtenus. Nous pouvons nous apercevoir que la capacité est maximale à 60 °C. Cependant, cette température se situe aux limites de bon fonctionnement de l’accumulateur. En effet, une utilisation, même de quelques cycles, à cette température peut provoquer un emballement thermique causant la destruction de la cellule *Li-Ion*.

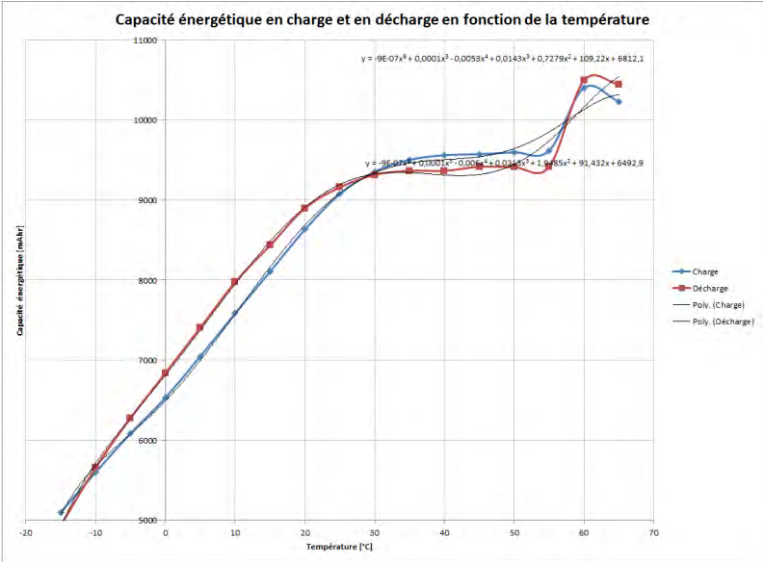


Figure 7. Capacité en charge et en décharge en fonction de la température d'un accumulateur de type Accuwatt -AWT 38120de 10Ah.

3. Modélisation thermique

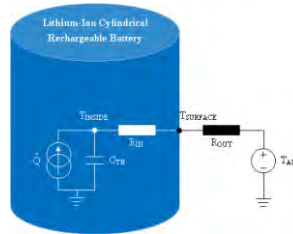


Figure 8. *Modèle thermique simplifié d'une batterie cylindrique.*

Tout comme la modélisation électrique, l'aspect thermique prend ces bases dans divers paramètres quantifiables. Pour notre cas d'étude, on considère le modèle de la Figure 8 (Do 2010) dont on cherche à déterminer les paramètres détaillés.

3.1. Mesure de la Capacité thermique

La capacité thermique (matérialisée par le paramètre C_{th} dans le modèle de la Figure 8) est la propriété qui permet de quantifier la capacité que possède un corps à absorber ou restituer de l'énergie par échange thermique. Cette capacité thermique (ou chaleur spécifique) peut être mesurée à partir d'un calorimètre adiabatique.

Nous proposons un banc de mesure permettant d'extraire les principaux paramètres thermiques du modèle considéré. La Figure 9 représente ce banc, constitué d'une alimentation stabilisée, d'un chargeur/déchargeur spécifique et d'un vase *Dewar* pouvant contenir une cellule *Li-Ion* plongé dans de l'eau distillée et permettant son isolement vis à vis de l'extérieur. Au milieu de la Figure 9 nous trouvons le chargeur/déchargeur que nous avons développé et à l'extrémité gauche, nous avons une alimentation stabilisée. L'alimentation fournit une tension continue pour une résistance chauffante placée dans le récipient adiabatique. La température est relevée par l'intermédiaire d'une sonde de température contrôlée via une instrumentation virtuelle d'acquisition *LabView*.

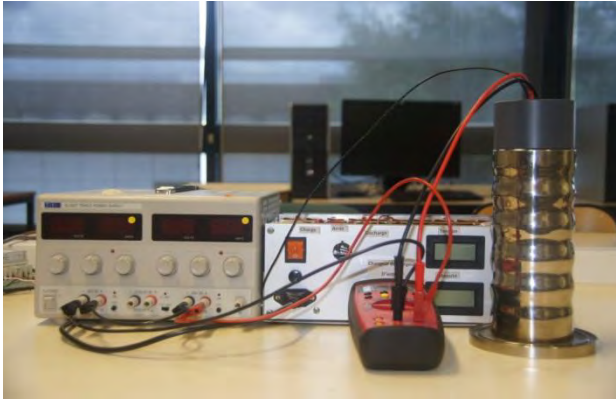


Figure 9. Banc de mesure des paramètres du modèle thermique d'une cellule Li-Ion.

La résistance électrique de ce banc permet de faire croître la température. C'est cette évolution croissante de la température qui permet de déterminer la capacité thermique de l'accumulateur en essai selon l'équation suivante qui lie la température à la capacité thermique :

$$Q = mC\Delta T, \quad [2]$$

Le terme Q est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par le corps en essai. m est la masse de ce corps et ΔT est la différence de température entre le début et la fin de la montée en température. En pratique, une première étape consiste à connaître la valeur du coefficient mC uniquement pour l'ensemble eau distillée + vase Dewar + résistance chauffante. Pour ce faire, une tension aux bornes de la résistance est appliquée, qui par effet Joule chauffe le contenu du vase. A partir des valeurs mesurées de la résistance, de la tension, du temps de mesure et la

température, la capacité thermique de l'ensemble du banc est déduite. Ensuite, les mêmes mesures sont réitérées avec une cellule *Li-Ion* plongée dans l'eau selon l'expression suivante:

$$Q = (mC_{banc} + mC_{accumulateur})\Delta T. \tag{3}$$

mC_{banc} est la valeur obtenue dans la première étape de mesure. A partir de cette expression la valeur de la capacité thermique de l'accumulateur est déterminée. La Figure 10 présente les résultats obtenus pour une cellule de type *Accuwatt -AWT 38120* de 10Ah. Ainsi, à partir d'une Energie totale fournie constant de 35,574kJ et une variation de température de $\Delta T = 18,053\text{ }^{\circ}\text{C}$, on détermine une capacité thermique de 1970 J/°C.

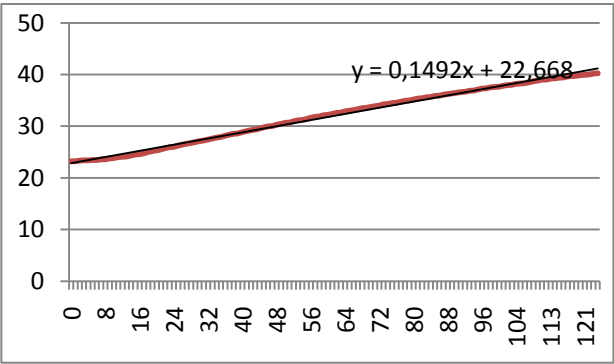


Figure 10. Résultats de mesure de la capacité thermique d'une cellule de type *Accuwatt -AWT 38120* de 10Ah.

3.2. Mesure du paramètre source de chaleur Q

Le modèle thermique considéré de la Figure 8 est spécifique à un accumulateur cylindrique. Ce modèle repose sur paramètre modélisant une source de courant correspondant à la chaleur générée par la cellule.

L'expression de cette source de chaleur est donnée par l'équation suivante (Thomas et al. 2003) :

$$\dot{Q} = I(V - U_{avg}) + IT \frac{\partial U_{avg}}{\partial T}. \quad [4]$$

$\dot{Q}$ représente la chaleur générée par l'accumulateur. I est le courant débité par l'accumulateur, T est la température de l'accumulateur et $\frac{\partial U_{avg}}{\partial T}$ est l'évolution de la tension à vide lors d'un cycle thermique. Le premier terme à droite correspond à la chaleur générée par l'effet Joule de la résistance interne de l'accumulateur et le second, à la chaleur entropique réversible.

3.3. Résistances *Rin* et *Rout*

Les résistances externes et internes (*Rin* et *Rout*) du modèle permettent de modéliser les transferts thermiques au sein et à l'extérieur de l'accumulateur. La résistance *Rin* représentera les transferts de type conduction entre le cœur et la surface de l'accumulateur, tandis que la résistance *Rout* modélise les transferts de radiation et de convection à l'extérieur de la cellule. L'extraction de ces résistances s'obtient pour la résistance externe par différentiation entre la température ambiante et la température de surface. Pour la résistance interne, par différentiation entre la température de surface et la température du cœur de la cellule. La difficulté pour la détermination de ce dernier paramètre réside à l'acquisition de la température au sein de la batterie (Do 2010).

4. Conclusion

L'étude du comportement électrique, thermique ainsi de l'évolution de la capacité, qui diffèrent selon la température, d'une batterie *Li-Ion* est fondamentale pour permettre d'établir son comportement en vue de son utilisation optimisée dans un contexte de source d'énergie des véhicules électriques. En effet, l'étude du comportement, électrothermique, ainsi que la capacité d'un accumulateur selon la température de fonctionnement permet de prédire son comportement en autonomie dans le but d'anticiper sa durée de vie.

Dans cet article, nous avons identifié les principaux paramètres électriques et thermiques permettant la modélisation fiable d'un

accumulateur LI-Ion. Nous avons proposé des bancs expérimentaux de mesure de l'ensemble de ces paramètres, à base d'interfaçages à instrumentation virtuelle, simple et efficace pour les mesures électriques et thermiques des accumulateurs Li-Ion. L'originalité de ces bancs est qu'ils permettent une identification rapide des paramètres caractéristiques nécessaires à toute modélisation du comportement réel d'un accumulateur Li-Ion. Nous pouvons conclure que les modèles considérés et les procédures de mesure expérimentales proposées permettent des acquisitions rapides et à moindre coût des principaux paramètres de tout type de cellule LI-Ion. L'objectif final est de permettre la modélisation du comportement exhaustif d'une cellule au plus près de son comportement en condition réelle de fonctionnement.

Bibliographie

Abu-Sharkh S., Doerffel D., « *Rapid test and non-linear model characterization of solid-state lithium-ion batteries* », Journal of Power Sources 130, p. 266-274, 2004.

Barsali S., Ceraolo M., « *Dynamic Models of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues* », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 1, Mars 2002.

Benini L., Castelli G., Macii A., Macii E., Poncino M., Scarsi R., « *Discrete-Time Battery Models for System-Level Low-Power Design* », IEEE Transactions on VLSI Systems, vol. 9, No.5, octobre 2001.

Chen M., Rincon-Mora G.A., « *Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance* », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 2, Juin 2006.

Do V.D., « *Diagnostic de batteries Lithium ion dans des applications embarquées* », Rapport de Thèse, Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire d'Electromécanique, 5 juillet 2010.

Gao L., Liu S., Dougal R.A., « *Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation* », IEEE Transactions on components and packaging technologies, Vol. 25, No. 3, Septembre 2002.

Schweighofer B., Raab K., Brasseur G., « *Modelling of High Power Automotive Batteries by the Use of an Automated Test System* », IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Anchorage, AK, USA, 21-23 May 2002.

Thomas K.E., Newman J., «*Thermal Modeling of Porous Insertion Electrodes*», Journal of Electrochemical Society, Vol.150 (2), A176-A192, 2003.

L. Cicero; C. Tanougast, H. Ramenah, P. Jean, F. Lecerf, P. Milhas et A. Dandache, «*Banc d'instrumentation pour la Mesure de l'influence de l'état de charge d'une batterie Lithium-Ion* », 6ème colloque interdisciplinaire en Instrumentation (C2I 2013), Editions Hermès Sciences, Lavoisier, 2013.



Lucas Cicero est doctorant en systèmes électroniques à l'Université de Lorraine à Metz depuis novembre 2011. Titulaire d'un Master *Radiocommunications et Systèmes Electroniques Embarqués*, il a intégré l'équipe ASEC du LCOMS dans le cadre d'une thèse CIFRE avec la société Nobel Plastiques. Il mène des travaux dans le thème de la problématique de gestion électronique intelligente et optimisée de batteries de type *Li-Ion* pour véhicules électriques.



Harry Ramenah, est maître de conférences à l'IUT de Metz au département Mesures Physiques et dont il assure la responsabilité de la plateforme GREEN. Il mène ses activités de recherches au sein de l'équipe ASEC du laboratoire LCOMS dans les thèmes des énergies renouvelables, la gestion optimisée de batterie électriques et de l'optique diffractive. Il assure la direction de la licence professionnelle GREEN (Gestion des Ressources Energétiques et Energies Nouvelles).



Camel Tanougast, titulaire de l'Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université de Metz depuis 2009, est Maître de conférences en Systèmes électroniques et microélectroniques à l'Université de Lorraine à Metz. Il mène ses activités de recherches au sein de l'équipe ASEC du laboratoire LCOMS dans les thèmes suivants et dont il assure les directions des recherches : systèmes reconfigurables et auto-organisés, systèmes et traitements temps réel, modélisation et conception architecturale de systèmes électroniques et/ou réseaux embarqués (SoC, NoC), traitements d'images, cryptographies et de la diffusion de la télévision numérique (DVB). Il est auteur et co-auteur de plus de 100 publications.

L'indépendance des banques centrales pendant l'Entre-deux-guerres

Une analyse quantitative

Nathalie Lévy*, Eric Dehay,**

** IUT de Tours – Université François Rabelais
Département Technique de Commercialisation
29, rue du Pont Volant, 37082 Tours cedex 2*

*** IUT de Lens – Université d'Artois
Département Gestion des Entreprises et Administrations
Rue de l'Université, SP16, 62307 Lens cedex*

nathalie.levy@univ-tours.fr , eric.dehay@univ-artois.fr

Sections de rattachement : 05
Secteur : Tertiaire

RÉSUMÉ. L'article présente une analyse quantitative de l'expérience d'indépendance des banques centrales pendant l'Entre-deux-guerres. Un indice mesurant l'indépendance d'un échantillon de trente neuf banques centrales sur la période 1918 – 1938 est construit. Il confirme la hausse de l'indépendance moyenne pendant cette période mais montre que la progression de l'indépendance ne signifie pas toujours que les banques centrales deviennent significativement indépendantes. Il confirme le rôle des accords internationaux dans la hausse de l'indépendance moyenne. Il indique que c'est l'indépendance financière des banques centrales qui augmentent le plus.

MOTS-CLÉS : politique monétaire, banque centrale, indépendance, Entre-deux-guerres

1. Introduction

L'Entre-deux-guerres représente une période tout à fait particulière de l'histoire de l'indépendance des banques centrales. Pour la première fois, les relations entre celles-ci et les gouvernements prennent une dimension véritablement formalisée. On voit ainsi émerger des caractéristiques de l'indépendance qu'on aurait tendance à considérer comme des innovations des années quatre vingt alors qu'elles ont été forgées dans le courant des années vingt ou trente et qu'elles constituent pleinement des éléments de l'expérience de l'Entre-deux-guerres. Ce texte présente une analyse quantitative de cette expérience d'indépendance afin d'évaluer son importance et de faire apparaître ses caractéristiques principales. L'article est organisé de la façon suivante. Le paragraphe 2 décrit la situation de l'Entre-deux-guerres à partir de références historiques et d'exemples de banques centrales. Le paragraphe 3 présente la méthode utilisée pour mesurer l'indépendance d'un échantillon de 39 banques centrales. Le paragraphe 4 présente et commente ces résultats empiriques.

2. L'expérience d'indépendance de l'Entre-deux-guerres

Après la Première Guerre Mondiale, la préoccupation principale des gouvernements est la stabilisation budgétaire et financière. L'expérience d'indépendance des banques centrales de l'Entre-deux-guerres naît de cette préoccupation. En effet, le « package budget équilibré, convertibilité-or de la monnaie et banque centrale indépendante, » (Bordo et al., 1999) apparaît alors comme la solution au problème d'inflation et de dette publique.

On souligne d'abord deux caractéristiques relatives à cette expérience.

- C'est la première fois que l'indépendance est internationalement reconnue comme un modèle d'organisation. Dès 1920, la Conférence Financière Internationale réunie à Bruxelles pose clairement la question du lien entre le maintien de la stabilité de la monnaie et l'organisation de la banque centrale. La troisième résolution adoptée alors s'oppose très nettement aux interférences entre le gouvernement et celle-ci.

« Les banques d'émission, indique-t-elle, doivent être libérées de toute pression politique ». L'accroissement du degré d'autonomie des banques centrales constitue dès lors un des éléments communs des schémas de reconstruction financière des pays placés sous la tutelle de la Société des Nations ou directement influencés par elle. On peut citer les exemples de l'Autriche, de la Hongrie, de la Pologne ou de la Bulgarie. On retrouve une tendance similaire dans certains pays d'Amérique du Sud tels que le Pérou, la Colombie ou la Bolivie dont les banques centrales ont été créées ou réorganisées à la même époque sous l'influence américaine.

- C'est également la première fois que, de façon aussi fréquente, l'indépendance est explicitement affirmée dans les statuts de certaines banques centrales. Le meilleur exemple est celui de l'Allemagne. L'article premier de la loi de 1924 précise en effet clairement que « la Reichsbank est indépendante du contrôle du gouvernement ». De la même manière, au Danemark, l'article 2 de la loi de 1926 indique qu' « aucun ordre du gouvernement ne doit interférer directement ou indirectement avec la gestion de la banque ». On peut enfin citer l'exemple du Pérou où l'article 72 de la loi de 1931 explique que, par cette loi, « le gouvernement s'engage contractuellement à ne réduire d'aucune façon les pouvoirs de la banque ».

Sur la base de ces deux caractéristiques, il apparaît que les critères utilisés aujourd'hui pour analyser et définir le concept d'indépendance sont déjà au centre des études faites sur ce sujet pendant la seconde partie de l'Entre-deux-guerres. L'analyse des formes d'indépendance réalisée dès 1928 par Kisch et Elkin recense un certain nombre de critères pour lesquels l'influence du gouvernement sur les banques centrales a été limitée dans différents pays. Ces critères s'inscrivent tous parmi les trois domaines généralement cités dans les travaux contemporains pour définir le champ couvert par le concept d'indépendance (voir notamment Eijffinger et De Haan, 1996).

- L'*indépendance directoriale* concerne l'influence du gouvernement sur les procédures de nomination. Pendant l'Entre-deux-guerres comme aujourd'hui, les gouverneurs des banques centrales sont nommés par le pouvoir politique dans presque tous les pays. Il existe néanmoins déjà un certain

nombre d'exceptions qui signalent l'indépendance dont bénéficient alors quelques banques centrales. C'est le cas en Angleterre où le gouverneur est nommé par les actionnaires et en Allemagne après 1924 où le président de la Reichsbank est nommé par un conseil comprenant des membres étrangers. Par ailleurs, la durée des mandats peut déjà être considérée comme un élément discriminant quant au degré de liberté dont disposent les dirigeants des banques centrales. Dans le cas du Federal Reserve Board par exemple, la durée des mandats est de dix ans, terme beaucoup plus long que ce qui est observé généralement (Federal Reserve Act de 1913).

- *L'indépendance politique* concerne la liberté laissée à la banque centrale dans la formulation et l'exécution de la politique monétaire. Il n'existe, pendant l'Entre-deux-guerres, que peu de pays pour lesquels l'intervention du gouvernement dans les décisions de politique monétaire est explicitement interdite par la loi. On citera néanmoins les exemples des banques centrales du Chili ou de la Colombie dont les statuts de 1925 ou 1931 indiquent explicitement que le gouvernement doit respecter l'opinion des directeurs. Dans certains pays, le contrôle du gouvernement sur la politique monétaire n'est qu'indirect. Les chartes des banques d'Autriche, de la Hongrie et du Danemark prévoient, par exemple, la nomination d'un commissaire chargé de veiller à la conformité des décisions de la banque avec la loi. Tant que la banque n'agit pas contre la loi, le gouvernement ne dispose alors d'aucun droit d'intervention. A l'opposé, un exemple de dépendance politique totale est offert par le Japon puisque « le gouvernement contrôle toutes les opérations de la Banque et empêche toute mesure qui pourrait être désavantageuse pour l'État » (article 24 de la loi bancaire de 1882).
- *L'indépendance financière* concerne la possibilité de financer directement ou indirectement les dépenses publiques par les crédits de la banque centrale. Dès l'Entre-deux-guerres, l'influence du gouvernement est parfois réduite par une limitation législative des avances que la banque peut lui accorder. Ainsi, en Autriche et en Hongrie, la banque centrale peut escompter des titres publics mais le gouvernement ne peut recourir à ces avances sans avoir au préalable versé à la banque la contrepartie en or ou en valeurs étrangères. On observe également des limitations moins restrictives qui concernent la durée des prêts ou le taux pratiqué. Citons le cas de la banque

centrale des Pays-Bas qui devait, sur la demande du Ministre des Finances, accorder des avances sans intérêt mais pour laquelle le montant des prêts était strictement limité par la loi de 1919.

A travers ces exemples, on peut souligner la diversité des expériences d'indépendance qui ont été menées pendant l'Entre-deux-guerres. On note également que ces expériences ont parfois été beaucoup plus poussées que celles que nous pouvons connaître aujourd'hui. C'est, par exemple, le cas pour la Reichsbank dont le président est nommé à vie jusqu'en août 1924 (loi bancaire du 18 mars 1875) ou pour la Banque d'Autriche jusqu'en 1927 qui ne peut réaliser aucune opération de crédit en faveur du gouvernement, y compris l'escompte de bons du Trésor. Ces exemples d'autonomie revêtent un caractère parfois extrême que l'on ne retrouve pas dans les épisodes plus récents d'indépendance des banques centrales.

3. Mesurer l'indépendance pendant l'Entre-deux-guerres

Une appréciation plus précise du degré d'indépendance des banques centrales pendant l'Entre-deux-guerres nécessite la construction d'un indice permettant d'observer des évolutions dans le temps et d'établir une comparaison entre pays. Nous nous appuyons sur la similitude des critères utilisés pendant l'Entre-deux-guerres et aujourd'hui pour analyser l'indépendance. Nous proposons ainsi une mesure de l'indépendance sur la période 1918 – 1938 en nous inspirant de la méthode utilisée, pour des périodes plus récentes, par Cukierman et al., 1992).

La construction de l'indice repose sur la lecture des statuts de banques centrales. Dix neuf caractéristiques légales y sont repérées. Le tableau 1 décrit ces caractéristiques ainsi que les codes et pondérations correspondants.

- La première étape d'élaboration de l'indice consiste à coder les 19 caractéristiques sur une échelle de 0 (niveau le plus faible d'indépendance) à 1 (niveau le plus élevé d'indépendance). S'agissant de l'indépendance

directoriale, les banques centrales dont le terme du mandat du gouverneur ou des membres du conseil est le plus long et pour lesquelles le gouvernement a peu d'autorité légale dans la nomination ou la démission des dirigeants sont classées comme plus indépendantes. S'agissant de l'indépendance politique, une banque centrale est considérée comme d'autant plus indépendante que la durée de son privilège d'émission est longue, que les conditions d'extension de l'émission au-delà de la couverture sont restrictives, que l'objectif de stabilité des prix est prioritaire et enfin, que son autonomie dans la formulation de la politique monétaire et sa résistance en cas de conflit avec le gouvernement sont élevées. S'agissant de l'indépendance financière, plus les conditions d'octroi de crédits au gouvernement sont restrictives, plus la banque centrale est considérée comme indépendante. Les limitations de prêts considérées concernent le montant des avances, leur échéance et les conditions de détermination des taux d'intérêt pratiqués sur ces crédits en différenciant les avances en blanc (c'est-à-dire directes sans support de titres) des avances contre titres (c'est-à-dire avec support de titres, à savoir avances directes contre dépôt de titres, ou avances indirectes via l'escompte ou l'achat de bons du Trésor, ...).

- La seconde étape d'élaboration de l'indice consiste à agréger les codes des 19 caractéristiques. Les sept caractéristiques relevant de l'indépendance directoriale sont agrégées par une moyenne arithmétique simple. Les cinq caractéristiques relevant de l'indépendance politique sont agrégées par une moyenne arithmétique pondérée visant à accroître le poids des conditions d'extension de l'émission monétaire et de la résolution des conflits. Ce choix de pondération est justifié par le degré de précision plus grand que les statuts des banques centrales de l'Entre-deux-guerres confèrent généralement à ces deux caractéristiques. En effet, sur les objectifs et la formulation de la politique, les lois revêtent plus souvent un caractère flou engendrant une interprétation moins uniforme et donc plus subjective du degré d'indépendance qu'elles impliquent. L'agrégation des caractéristiques relevant de

l'indépendance financière s'effectue en deux temps. La pondération des caractéristiques concernant les avances en blanc fait ressortir le poids de la limitation des volumes de crédit accordé alors qu'en ce qui concernent les avances sur titres, elle privilégie l'échéance et le taux d'intérêt. Une moyenne pondérée des deux catégories d'avance est effectuée accordant un poids supérieur à la limitation des avances en blanc. L'indice agrégé mesurant l'indépendance totale est enfin obtenu en calculant la moyenne arithmétique simple des trois indices d'indépendance par domaine.

Tableau 1 . Caractéristiques de l'indépendance légale

<i>Caractéristiques</i>	<i>poids</i>	<i>code</i>
<i>1/ Direction de la banque : gouverneur et conseil</i>	1	
<i>a) terme du mandat</i>		
- supérieur ou égal à 8 ans		1
- 6 à 8 ans		0.75
- 5 ans		0.5
- 4 ans		0.25
- inférieur à 4 ans ou à discrétion du responsable de la nomination		0
<i>b) qui nomme le gouverneur ?</i>		
- conseil de la banque		1
- décision collective de la banque, des pouvoirs exécutif et législatif		0.75
- pouvoir législatif		0.5
- pouvoir exécutif collectivement (conseil des ministres)		0.25
- un seul représentant de l'exécutif		0
<i>c) qui nomme le conseil ?</i>		
- tous les membres sont choisis par des corps extérieurs		1
- certains membres sont choisis par des corps extérieurs		0.8
- décision collective de la banque, des pouvoirs exécutif et législatif		0.6
- pouvoir législatif		0.4
- pouvoir exécutif collectivement (conseil des ministres)		0.2
- un seul représentant de l'exécutif		0

<i>d) conditions pour démettre le gouverneur ou les membres du conseil</i>		
- non-prévu par la loi		1
- pour raisons non-liées à la politique monétaire (ex : incapacité physique)		0.83
- à la discrétion du conseil de la banque		0.67
- à la discrétion du pouvoir législatif pour motif lié à la politique monétaire		0.5
- à la discrétion du pouvoir législatif sans condition de motif		0.33
- à la discrétion du pouvoir exécutif pour motif lié à la politique monétaire		0.17
- à la discrétion du pouvoir exécutif sans condition de motif		0
<i>e) les membres du conseil peuvent-ils exercer d'autres fonctions ?</i>		
- la loi l'interdit		1
- sous conditions (d'autorisation du pouvoir exécutif par exemple)		0.5
- pas d'interdiction exprimée dans la loi		0
<i>f) Le conseil contient-il des membres du gouvernement ?</i>		
- non		1
- oui		0
<i>g) Le conseil contient-il des membres étrangers ?</i>		
- oui		1
- non		0
<i>2/ Formulation de la politique</i>		
<i>a) durée du privilège d'émission</i>	0.15	
- perpétuelle		1
- supérieure ou égale à 50 ans		0.75
- de 25 (compris) à 50 ans		0.5
- de 10 (compris) à 25 ans		0.25
- inférieure à 10 ans ou à discrétion du gouvernement		0
<i>b) conditions d'extension de l'émission au-delà de la couverture</i>	0.275	
- il n'existe aucune disposition pour suspendre les règles de couverture		1
- l'extension de l'émission est liée à une augmentation du taux d'escompte		0.66
- les possibilités d'extension de l'émission sont strictement limitées par la loi		0.33
- les possibilités sont faiblement ou non limitée par la loi		0

<i>c) objectifs attribués à la banque centrale</i>	0.15	
- stabilité de la valeur de la monnaie comme objectif unique ou prioritaire		1
- stabilité de la valeur de la monnaie mentionnée parmi d'autres objectifs		0.66
hors considération sur le développement de l'économie ou la fourniture de crédit		
- non-défini ou comprenant, à côté de la stabilité de la valeur de la monnaie, des considérations sur le développement de l'économie ou la fourniture de crédit		0.33
- comprenant uniquement des considérations sur le développement de l'économie ou du crédit		0
<i>d) qui formule la politique monétaire ?</i>	0.15	
- la banque seule		1
- la banque mais un membre du gouvernement est présent au conseil sans droit de vote		0.75
- concertation entre la banque et le gouvernement ou non défini		0.5
- la banque est seulement un conseil		0.25
- le gouvernement décide seul		0
<i>e) directives du gouvernement et résolution des conflits ?</i>	0.275	
- la banque a autorité finale concernant ce que la loi définit clairement comme étant ses objectifs		1
- un conseil tripartite (BC, pouvoirs exécutifs et législatifs) règle les conflits		0.8
- non-défini		0.6
- le pouvoir législatif a autorité finale concernant les conflits liés à la politique monétaire		0.4
- le pouvoir exécutif a autorité finale pour les conflits sur la politique monétaire mais selon un processus prévu et avec possible protestation de la banque		0.2
- le pouvoir exécutif a autorité finale sans condition		0
<i>3/ Limitations des crédits au gouvernement</i>		
<i>a) avances en blanc au gouvernement</i>	0.6	
<i>a1) montant des avances</i>	0.4	
- aucune avance n'est autorisée		1
- permis mais dans des limites strictes (définies en montant absolu)		0.75
- permis mais dans des limites strictes (définies en montant relatif)		0.5
- permis avec des limites lâches (modifiables ou négociables par exemple)		0.25
- pas de limites légales		0

<i>a2) l'objet des avances consenties doit-il être déterminé ?</i>	0.2	
- oui (ex : uniquement pour des dépenses prévues dans le budget)		1
- non		0
<i>a3) durée des avances</i>	0.2	
- déterminée par la banque		1
- échéance inférieure à 1 an prévue par la loi		0.66
- échéance supérieure à 1 an prévue par la loi		0.33
- non-définie ou déterminée par le gouvernement		0
<i>a4) intérêts payés sur les avances</i>	0.2	
- déterminés par la banque		1
- déterminés à partir d'une règle stricte prévue par la loi		0.66
- déterminés à partir d'une négociation aux modalités prévues par la loi		0.33
- non-définis ou déterminés par le gouvernement		0
<i>3/ Limitations des crédits au gouvernement</i>	0.4	
<i>b1) montant des avances</i>	0.2	
- aucune avance n'est autorisée		1
- permis mais dans des limites strictes (définies en montant absolu)		0.75
- permis mais dans des limites strictes (définies en montant relatif)		0.5
- permis avec des limites lâches (modifiables ou négociables par exemple)		0.25
- pas de limites légales		0
<i>b2) durée des avances</i>	0.4	
- déterminée par la banque		1
- échéance inférieure à 1 an prévue par la loi		0.66
- échéance supérieure à 1 an prévue par la loi		0.33
- non-définie ou déterminée par le gouvernement		0
<i>b3) intérêts payés sur les avances</i>	0.4	
- déterminés par la banque		1
- déterminés à partir d'une règle stricte prévue par la loi		0.66
- déterminés à partir d'une négociation aux modalités prévues par la loi		0.33
- non-définis ou déterminés par le gouvernement		0

4. L'évolution de l'indépendance pendant l'Entre-deux-guerres

Nous calculons l'indice d'indépendance pour trente neuf banques centrales. Le tableau 2 présente les pays étudiés ainsi que les principales sources bibliographiques utilisées pour évaluer chaque critère de l'indice. Le choix dans la composition de l'échantillon repose uniquement sur la disponibilité des données concernant les statuts des banques centrales.

Tableau 2 . Principales sources pour le calcul des indices nationaux

<i>Pays</i>	<i>Références</i>
Afrique du Sud	Kisch et Elkin (1928, 1932), De Kock (1954)
Allemagne	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932), Uhlenbruck (1968)
Angleterre	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Australie	Kisch et Elkin (1928, 1932), Giblin (1951)
Autriche	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932), Austrian Central Bank (1966)
Belgique	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932), Van der Wee et al. (1975)
Bolivie	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Bulgarie	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Chili	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Chine	Société des Nations (1920), Tchen (1931)
Colombie	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Danemark	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Équateur	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Égypte	Antonini (1927), Commission of Financial Advisers (1920)
Espagne	Kisch et Elkin (1928, 1932), Servais (1932)
Estonie	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
États-Unis	Kisch et Elkin (1928, 1932), Kemmerer (1920, 1932, 1936)
Finlande	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)

France	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932), Servais (1932)
Grèce	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Hongrie	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Irlande	Singer (1932), Hall (1949)
Italie	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Japon	Kisch et Elkin (1928, 1932)
Lettonie	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Liban	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Lithuanie	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Mexique	Manero (1926), Banco de Mexico (1936)
Norvège	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932), Servais (1932)
Pays-Bas	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Pérou	Commission of Financial Advisers (1922) et (1931)
Philippines	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Pologne	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Roumanie	Singer (1932)
Suède	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Suisse	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932)
Tchécoslovaquie	Kisch et Elkin (1932), Singer (1932)
Turquie	Sükrü (1933), Central Bank of the Turkish Republic (1932-38)
URSS	Kisch et Elkin (1928, 1932), Singer (1932), Arnold (1937)

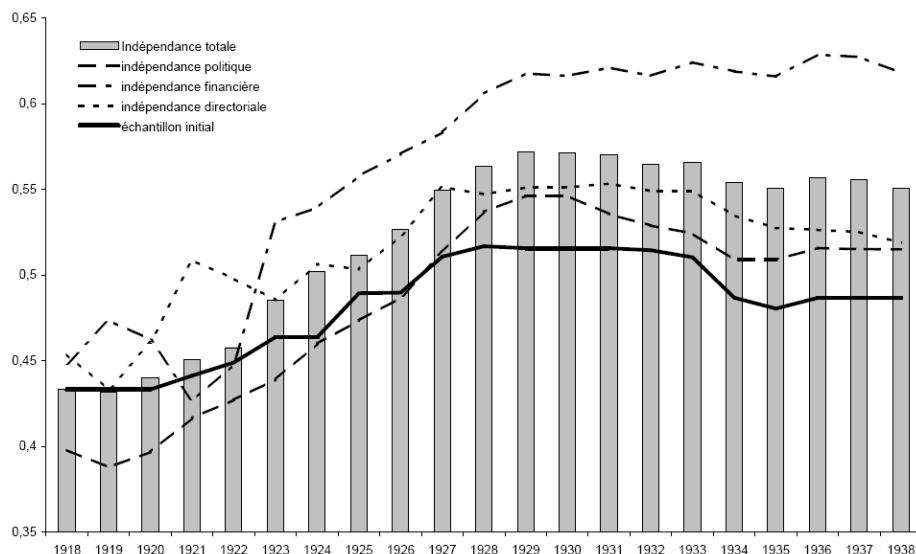
Le graphique 1 présente l'évolution de la moyenne des indices nationaux d'indépendance entre 1918 et 1938 (histogramme), l'évolution de la moyenne des indices des quinze banques centrales constituant « l'échantillon initial » c'est-à-dire celles qui sont présentes dans l'échantillon pendant l'ensemble de la période (courbe pleine) ainsi que l'évolution des domaines d'indépendance (lignes en pointillés). On peut souligner quatre résultats principaux.

- L'évolution de la moyenne des indices confirme que l'augmentation de l'indépendance constitue une tendance générale de l'Entre-deux-guerres. Cette augmentation se

déroule surtout entre 1918 et 1929 : entre ces deux dates, la moyenne des indices nationaux progresse de presque un tiers.

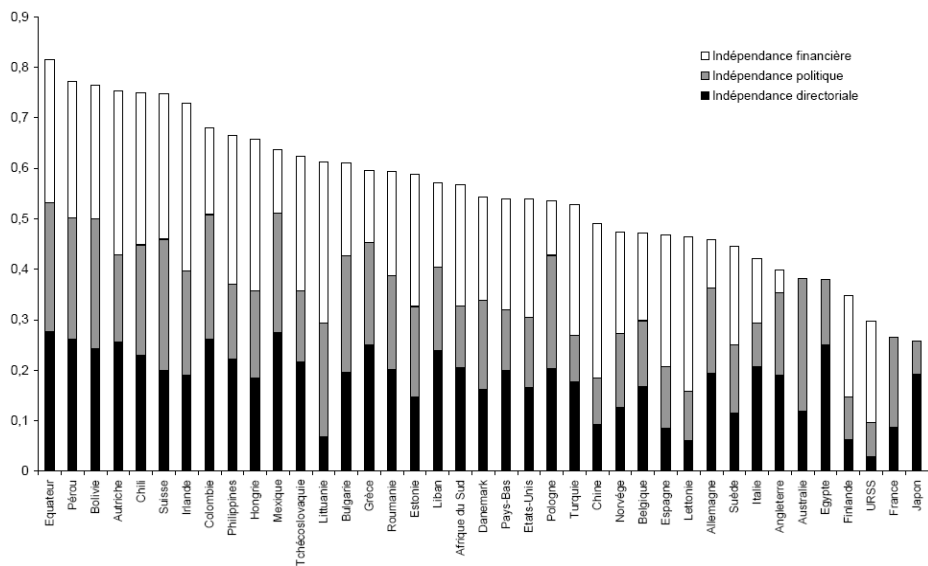
- L'augmentation de l'indépendance entre 1919 et 1929 concerne à la fois les banques centrales déjà existantes et celles nouvellement créées. Les statuts de nombreuses banques nées avant la guerre sont modifiés pour les rendre plus indépendantes (Allemagne ou Bulgarie par exemple). Celles qui sont créées après la guerre (et entrent dans l'échantillon) sont souvent dotées dès le départ d'un statut qui les rend particulièrement indépendantes (Autriche ou Pérou par exemple).
- Chaque domaine d'indépendance participe à la progression de l'indépendance totale entre 1918 et 1929. Sur cette période, les banques centrales deviennent en moyenne plus indépendantes, à la fois en ce qui concerne leur direction, la distribution de financements et les choix de politique monétaire. L'indépendance directoriale moyenne progresse de 22 % entre 1918 et 1929, l'indépendance politique moyenne de 37 % et l'indépendance financière moyenne de 38 %. Ce dernier domaine a un poids prépondérant dans l'indépendance totale.
- Le niveau moyen d'indépendance diminue légèrement au cours des années trente (de moins de 5 % entre 1929 et 1938), notamment du fait d'un recul de l'indépendance directoriale et de l'indépendance politique. L'indépendance totale reste nettement plus élevée à la veille de la Seconde Guerre Mondiale qu'elle ne l'était à la fin de la précédente.

Graphique 1. *Évolution annuelle de la moyenne des indices nationaux d'indépendance*

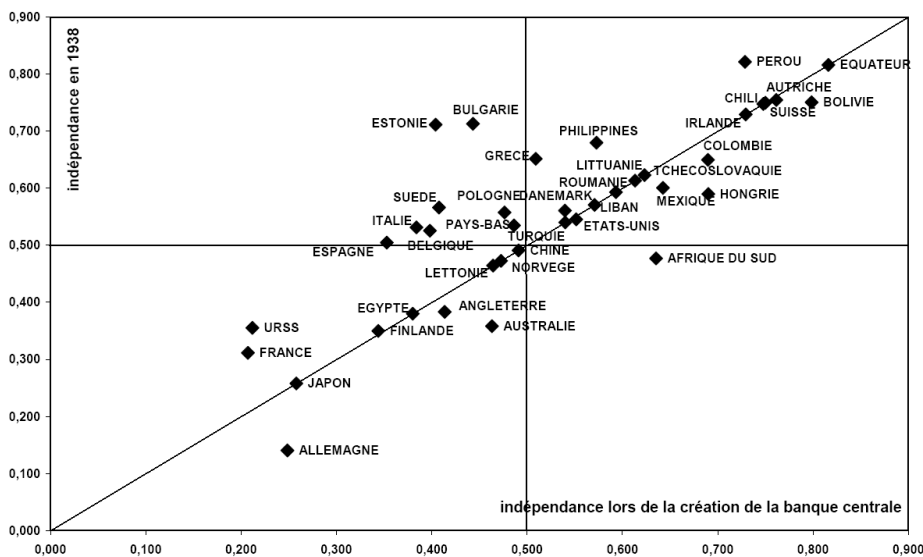


Le graphique 2 décrit l'indépendance moyenne par pays pour la période 1918 – 1938 ainsi que la décomposition de cette indépendance par domaine. Les banques centrales les plus indépendantes sont celles qui ont été réorganisées après la Première Guerre Mondiale dans le cadre d'accords internationaux (voir le paragraphe 2). Cela concerne les banques d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud, principalement réorganisées sous l'influence américaine (Équateur ou Pérou par exemple). Cela concerne également les banques de l'est de l'Europe, principalement réorganisées sous l'influence de la Société des Nations (Autriche ou Hongrie par exemple). Les banques centrales les moins indépendantes financièrement sont aussi celles dont l'indépendance totale est la plus faible (France et Japon).

Graphique 2. Moyenne des indices nationaux d'indépendance entre 1918 et 1938



Graphique 3. Évolution des indices d'indépendance entre l'année de création de la banque centrale et 1938



5. Conclusion

L'expérience d'indépendance des banques centrales entre 1918 et 1938 semble avoir au moins deux points communs avec celle que nous connaissons depuis les années 80. L'évolution vers plus d'indépendance résulte, dans les deux cas, de la reconnaissance internationale d'un certain modèle d'organisation en matière de politique monétaire. Ce modèle d'organisation prend des formes identiques pendant les deux périodes avec des domaines et des critères d'indépendance relativement immuables. Outre qu'elle montre le caractère significatif de l'expérience, un résultat important de l'analyse quantitative de la situation de l'Entre-deux-guerres est qu'elle confirme le rôle de l'environnement international dans le développement de l'indépendance (les banques centrales les plus indépendantes sont celles qui ont été réorganisées dans le cadre d'accords internationaux) et qu'elle conduit à souligner, parmi les critères d'indépendance, l'importance de l'indépendance financière.

L'expérience de l'Entre-deux-guerres apparaît alors comme un objet d'analyse qui doit nous permettre de mieux connaître les déterminants et les conséquences de l'indépendance des banques centrales dans la perspective d'une réflexion sur la situation actuelle. Deux orientations principales peuvent être envisagées quant à la recherche ultérieure sur ce sujet. La première doit porter sur les effets de l'indépendance sur l'inflation et la croissance pendant l'Entre-deux-guerres. La seconde sur l'analyse des raisons ayant conduit à réduire l'indépendance des banques centrales après la crise de 1929 puis après la Seconde Guerre Mondiale.

Bibliographie

Antonini E., « *Le crédit et la banque en Egypte* », Vaney-Burnier Publishing, Lausanne, 1927.

Arnold A.Z., « *Banks, Credit and Money in Soviet Russia* », Columbia University Press, 1937.

Austrian Central Bank, « *Geschichte des Österreichischen Noteninstituts (1916-1966)* », Vienna, 1966.

Banco de Mexico, « *Ley organica del Banco de Mexico, 28 de agosto de 1936* », Editorial Cultura, Mexico D.F., 1936.

Bordo M., Edelstein M., Rockoff H., « Was Adherence to the Gold Standard a Good Housekeeping Seal of Approval during the Interwar Period? », *NBER Working Paper*, n° 7186, June 1999.

Central Bank of the Turkish Republic, « *Bulletin de la banque centrale de la République de Turquie* », 1932-1938.

Commission of Financial Advisers, « Khedivial Decree of June 1898, modified in May 1920 », *Kemmerer Papers*, Mudd Library, Princeton University, Box 184, 1920.

Commission of Financial Advisers, « Banco de Reserva del Peru : Ley Organica », *Kemmerer Papers*, Mudd Library, Princeton University, Box 217, 1922.

Commission of Financial Advisers, « Project of Law for the Creation of the Central Reserve Bank of Peru », *Kemmerer Papers*, Mudd Library, Princeton University, Box 229, 1931.

Cukierman A., Webb S.B., Neyapti B. « Measuring the Independence of Central Banks and its Effects on Policy Outcomes », *The World Bank Economic Review*, n°6, 1992.

De Kock G., « *A History of South African Reserve Bank (1920-1952)* », Van Schaik, Pretoria, 1954.

Eijffinger S.C.W., De Haan J., « The Political Economy of Central Bank Independence », *Special Paper in International Economics*, Princeton University, n°19, 1996.

Giblin L.F., « *The Growth of a Central Bank: The Development of the Commonwealth Bank of Australia (1924-1945)* », Melbourne University Press, 1951.

Hall F.G., « *History of the Bank of Ireland* », Blackwell, Oxford, 1949.

Kemmerer E.W., « *The ABC of The Federal Reserve System* », Princeton University Press, 4th, 9th and 10th editions, 1920-1932-1936.

Kisch C.H., Elkin W.A., « *Central banks: A study of the Constitutions of Banks of Issue with an Analysis of Representative Charters* », Macmillan, London, 1st and 2nd editions, 1928 et 1932.

Manero A., « *El Banco de Mexico, sus origins y fundacion* », New-York, Mayans Impressor, 1926.

Servais E., « *Banques d'émission. Banque de France. banques coloniales. banques étrangères* », Librairie générale de droit et de jurisprudence, Paris, 1932.

Singer P., « *Monetary and Central Bank Laws* », Economic Intelligence Service, League of Nations, Geneva, 1932.

Société des Nations, « *Régimes et circulation monétaire d'Après-guerre* », Harrison and Sons, Londres, 1920.

Sükrü R., « *La banque centrale de la République de Turquie* », Istanbul, 1933.

Tchen T.S., « *La circulation fiduciaire et les banques d'émission centrales en Chine* », Doctorat, Université de Nancy, Imprimerie Thomas, 1931.

Uhlenbruck D., « *Die verfassungsmässige Unabhängigkeit der Deutschen Bundesbank und ihre Grenzen* », München, 1968.

Van der Wee H., Tavernier K. « *La Banque Nationale de Belgique et l'histoire monétaire entre les deux guerres mondiales* », Banque Nationale de Belgique, Bruxelles, 1975.



Nathalie Lévy est maître de conférences en sciences économiques à l'Université de Tours. Ses recherches portent sur l'intermédiation financière et l'indépendance des banques centrales.



Eric Dehay est maître de conférences en sciences économiques à l'Université d'Artois. Ses recherches portent sur les formes institutionnelles de la politique monétaire et sur l'indépendance des banques centrales.

Microorganismes et matériaux cimentaires

Dégradation et protection

Sébastien Roux*, André Lecomte*, Françoise Feugeas**

** Institut Jean Lamour / Université de Lorraine - IUT Nancy Brabois, Dpt Génie Civil Le Montet - Rue du Doyen Urion, CS 90137 54 601 VILLERS LES NANCY*

*** ICube, Université de Strasbourg, CNRS, INSA de Strasbourg, 2 rue Boussingault, 67084 Strasbourg*

sebastien.roux@univ-lorraine.fr

Sections de rattachement : 60, 33
Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ. Les interactions des matériaux cimentaires avec les microorganismes et leurs métabolites peuvent engendrer la dégradation des matériaux mais également participer à leur protection. La première des deux études présentées ici montre tout d'abord le potentiel de dégradation biologique que représente un environnement naturel : la nappe phréatique rhénane. La seconde présente une utilisation originale de biopolymères éco-respectueux comme adjuvant pour lutter contre la corrosion des armatures.

MOTS-CLÉS : matériaux cimentaires, microorganismes, durabilité, biodégradation, protection

1. Introduction

Les bétons sont des roches artificielles composées de granulats, de ciment, d'eau et de divers adjuvants. Evoluant dans des conditions environnementales très variées, les matériaux cimentaires sont ainsi soumis à de nombreux facteurs de dégradation, d'origine physique, chimique ou encore biologique, et dont les interactions créent

généralement des synergies de dégradation. Ces environnements contiennent généralement des éléments vivants tels que les bactéries, les algues ou encore les champignons. Les relations entre les microorganismes et les matériaux cimentaires sont complexes et ont été récemment qualifiées de « love-hate¹ » (De Belie, 2010). En effet, ces éléments biologiques peuvent être l'origine d'altération des façades et parements (tâches et salissures) mais peuvent également induire de sévères dégradations (biodétérioration). Cependant, les microorganismes peuvent aussi participer à la protection voire la réparation des ouvrages en béton armé :

- l'incorporation de microorganismes dans un béton peut permettre la réparation des fissures naissantes par le développement contrôlé d'espèces bactériennes calcifiantes permettant le comblement de celles-ci (Wiktor et al., 2011).
- certains métabolites bactériens peuvent participer à la protection anti-corrosion des armatures (Roux et al., 2010).

2. Biodétérioration

La biodétérioration des matériaux est nécessairement liée à la colonisation de leur surface par des microorganismes et la formation d'un biofilm. Les biofilms peuvent être considérés comme des tissus vivants principalement constitués de microorganismes, de substances extracellulaires polymériques (SEP ou exo-polysaccharides 85% à 98% de la masse organique), d'eau (98% – 99% de la masse totale), de minéraux et de substances chimiques (fer, magnésium, etc.). Les matériaux cimentaires sains présentent un pH de surface de l'ordre de 13 qui inhibe sa colonisation microbienne. Cependant, la composition chimique de surface évolue avec le temps et l'humidité relative du fait de l'instabilité en présence de CO₂ des principales phases cimentaires. Ce phénomène de carbonatation engendre la formation de calcite et une baisse de l'alcalinité de la surface (pH $\approx$ 9) permettant ainsi sa colonisation par des microorganismes neutrophiles. La biodétérioration du matériau peut alors être due :

¹ amour-haine

- à la réaction de métabolites agressifs – tels que l’acide sulfurique, l’acide nitrique ou encore des acides organiques – avec les différents constituants de la matrice cimentaire,
- à la pénétration et au développement d’éléments biologiques dans leur réseau poreux s’accompagnant d’un accroissement des contraintes de traction internes au matériau.

La dégradation chimique des bétons liée à l’activité métabolique des microorganismes est bien connue dans les environnements spécifiques tels que les réseaux d’assainissement. Les bactéries sulfo-oxydantes (BSO) de l’espèce *Thiobacilli thiooxidans* (initialement appelées *Th. concretivorus*) sont reconnues comme capables de dégrader les matériaux cimentaires (Parker en 1945 (Parker, 1945)). Leur activité métabolique inclut la sécrétion d’acide sulfurique qui réagit avec la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour former du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) puis de l’ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), deux produits expansifs de moindre résistance mécanique. A l’inverse, la biodétérioration des matériaux cimentaires n’est encore que peu étudiée dans les environnements naturels. Les travaux présentés et centrés sur la problématique de la bioréceptivité s’intègre dans un étude visant à déterminer l’influence des microorganismes dans la dégradation des matériaux cimentaires en contact avec la nappe phréatique rhénane.

2.1. Matériel et méthodes

Les échantillons utilisés sont des échantillons de mortier normalisé et de pâte de ciment réalisés à partir de trois bases cimentaires : un ciment Portland CEM I 42,5 R CE CPS, un ciment de haut fourneau CEM III/C 32.5 N CE PM-ES, un ciment composé CEM V/A (S-V) 32.5 N CE PM-ES CP1. Les nuances CEM III/C et CEM V/A sont généralement préconisées pour la réalisation d’ouvrages dans des environnements chimiquement agressifs. Les échantillons de mortier normalisé ont été fabriqués en suivant la norme EN 196-1. Les échantillons de pâte de ciment ont été fabriqués en avec un rapport massique eau / ciment de 0,4. Après démoulage, les échantillons cubiques de 5 cm de côté ont subi une

cure d'au moins 28 jours dans un environnement à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ dont l'hygrométrie est supérieure à 90%. A l'issue de cette cure les échantillons ont été découpés sous la forme de prisme de $10 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ et polis au papier de verre de grade 180.

Tous les milieux de laboratoire ont été réalisés à partir d'eau de la nappe phréatique Rhénane contenant des microorganismes environnementaux qui a été enrichie en nutriments. Les essais ont été menés en utilisant 3 types de nutriments sélectifs favorisant respectivement le développement :

- des bactéries sulfo-oxydantes (BSO), type bactérien le plus souvent incriminé dans les cas de biodétérioration des bétons. Ces bactéries aérobies ont été cultivées à l'aide du milieu de Gübner (Gübner, 1998).

- des bactéries sulfato-réductrices (BSR), bactéries anaérobies fréquemment rencontrées dans les environnements naturels et incriminées dans de nombreux cas de biocorrosion des aciers, cultivées à l'aide du milieu de Starkey (Starkey, 1958).

- des bactéries thiosulfato-réductrices (BTR), bactéries anaérobies cultivées à l'aide du milieu de Magot (Magot et al., 1988). L'agressivité de ces microorganismes vis-à-vis des bétons n'est pas citée dans la littérature.

Les essais de bioréceptivité ont été menés :

- sur les échantillons de mortier immergés dans le milieu naturel pendant 1 an, La bioréceptivité de ces échantillons a été analysée en termes de densité surfacique de colonisation. Après 1 an d'immersion, les échantillons ont été extraits de la nappe phréatique et placés dans de l'eau distillée stérilisée. Les microorganismes présents à la surface des échantillons ont ensuite été détachés par sonication (67 kHz pendant 10 minutes) puis cultivés en boîte de Pétri sur milieu de culture sélectif.

- sur les échantillons de pâte de ciment plongés dans les 3 milieux de culture sélectifs. L'anaérobiose nécessaire au développement des BSR et des BTR a été obtenue par bullage d'azote filtré à $0,22 \mu\text{m}$ pendant 30 minutes. Ces essais de laboratoire ont été menés dans des flacons stériles contenant chacune des trois nuances cimentaires. L'incubation des

réacteurs (milieu de culture + échantillons) a été faite dans une étuve non ventilée à une température de $35\pm1^{\circ}\text{C}$ sur une période de 3 semaines. Ces échantillons ont été analysés à l'aide d'un microscope électronique à pression contrôlé Philips XL30 ESEM. Les analyses ont été effectuées sous une pression partielle de vapeur d'eau de 1 Torr (133 Pa) permettant de ne recourir à aucune préparation des échantillons préalablement à leur analyse.

2.2. Résultats et discussion

Le Tableau 1 présente les différents taux de colonisation des échantillons de mortier immergés dans la nappe phréatique rhénane pendant 1 an.

	Taux de colonisation [microorganismes / cm ²]		
	BSR	BSO	BTR
CEM I	Non détectées	205	9400
CEM III/C	195	390	590
CEM V/A	Non détectées	2100	4800

Tableau 1 . Nombre de BTR, BSR et BSO détectés dans les biofilms formés au bout d'un an dans la nappe phréatique sur les trois nuances cimentaires.

Les mortiers des trois bases cimentaires sont colonisés après un an d'immersion et cette colonisation dépend de la nuance cimentaire. Les BTR sont les bactéries les plus représentées et tous les échantillons sont colonisés par des BSO potentiellement dangereuses pour le matériau et que l'échantillon de base cimentaire CEM V est celui qui en présente la plus forte densité. Enfin, bien que la pâte de ciment de CEM III soit celle étant la moins colonisée, elle est la seule à présenter à sa surface des BSO et des BSR, association à l'origine de la détérioration du béton des réseaux d'assainissement. Les échantillons ayant tous été préparés de manière identique et soumis aux mêmes conditions d'exposition, la composition chimique des échantillons est le seul paramètre variable et ainsi à l'origine des différences de colonisation et donc de bioréceptivité des échantillons dans le milieu naturel. Ces mesures ne permettant que de

détecter les microorganismes cultivables, on ne peut affirmer qu’aucune BSR ne soit présente à la surface des pâtes de ciment de CEM I et CEM V. Si les BSR présentes à la surface de ces échantillons ne sont pas cultivables, elles ne seront pas détectées.

L’analyse des échantillons de CEM III plongés dans les milieux BTR et BSR (Figure 1 et Figure 2) et de CEM V plongés dans le milieu BTR (Figure 1) montre que les fissures de quelques micromètres de large sont des zones où la colonisation des échantillons est particulièrement importante. Certains échantillons présentent des zones d’éclats qui sont dues à la préparation des échantillons, leur analyse montre des colonisations importantes des bords de ces éclats (Figure 2). Ces essais mettent ainsi en évidence que les zones présentant une topographie spécifique sont plus densément colonisées après 3 semaines d’incubation. La colonisation des fissures peut s’avérer particulièrement dommageable car ces fissures constituent un vecteur de propagation pour les éléments agressifs et permettent la pénétration des microorganismes (Roux et al., 2006) et les substances métabolisées dans ces interstices pouvant entraîner une augmentation de la pression interne du matériau.

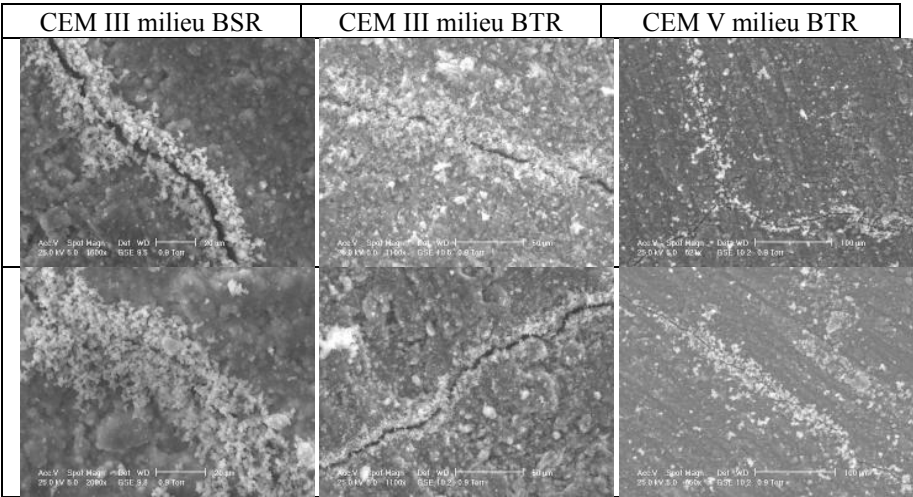


Figure 1 . Colonisation des fissures, milieux BTR et BSR

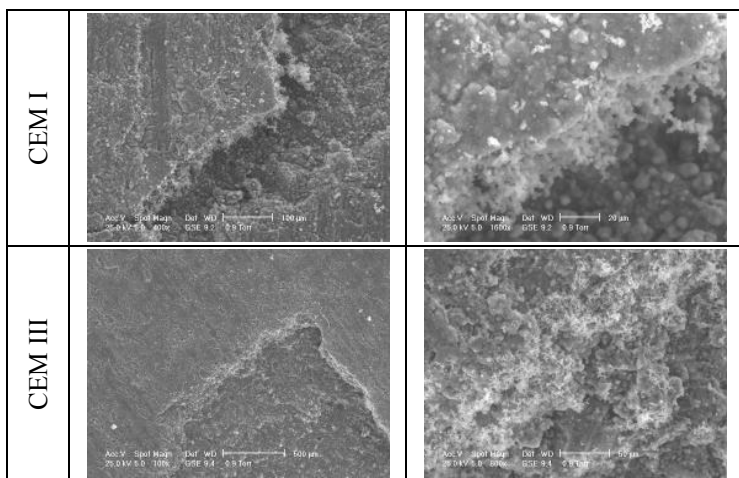


Figure 2 : Colonisation des bords d'éclats, milieu BTR

D'après Guillitte (Guillitte, 1995), la bioréceptivité d'un matériau de construction est principalement liée à sa rugosité, sa porosité et sa nature minéralogique. La topographie et la rugosité spécifiques de ces zones engendrent une augmentation locale de la surface de réaction entre le matériau et le CO₂ qui peut alors s'accompagner d'une accélération de la carbonatation et de la chute de pH nécessaire à la colonisation de la surface par les bactéries (Yamanaka et al., 2002). La carbonatation nécessite un apport de dioxyde de carbone et d'humidité, les zones de rugosité spécifique peuvent permettre de conserver localement une humidité permettant la dissolution du dioxyde de carbone avant leur immersion dans les milieux de culture. Au regard de la faible épaisseur de carbonatation nécessaire à la colonisation microbienne des matériaux cimentaires, la mesure de la carbonatation par l'intermédiaire de la baisse de pH de la surface à la phénolphtaléine ne permet pas de mettre en évidence une carbonatation spécifique des ces zones du fait du manque de précision de la technique. La rugosité de surface des zones non polies est différente du reste de la surface des échantillons. Des essais en milieu de culture général sur des échantillons de pâtes de ciment de nuance cimentaire CEM I respectivement polis au papier de verre de grade 180, 600 et 4000 immergés dans le même flacon ont montré une colonisation légèrement plus marquée pour l'échantillon poli avec le papier de verre

de grade 600 (Roux, 2008). Cet essai ne permet cependant pas de conclure sur l'influence de la seule rugosité sur la colonisation de la surface car quand une surface est polie, sa topographie n'est pas le seul paramètre qui évolue, l'énergie de surface est également affectée car le polissage modifie la surface des cristaux (abrasion, clivage). L'énergie de surface est un paramètre de grande importance dans les phénomènes d'adhésion des microorganismes (Rouxhet, 2008). Bien que la rugosité locale de la surface puisse être considérée comme un facteur pouvant influencer la colonisation du matériau, elle ne peut pas constituer à elle seule une justification suffisante aux différences de colonisation sur une même surface. Ces différentes explications ne justifient que partiellement la colonisation préférentielle des fissures et éclats de pâte de ciment. L'action simultanée des paramètres cités constitue un exemple de facteurs influençant la colonisation des zones de topographie spécifique.

2.3. Conclusion

L'objectif de cette première étude est de déterminer l'importance du facteur microbiologique dans l'altération et, éventuellement, la dégradation des bétons au contact des eaux douces naturelles. Les analyses ont permis de mettre en évidence l'importance de la topographie de la surface des échantillons sur la bioréceptivité des échantillons et de montrer la présence de Bactéries Thiosulfato-Réductrices et de Bactéries Sulfo-oxydantes à la surface des échantillons de pâte de ciment (CEMI, CEMIII et CEMV) après un an d'immersion dans la nappe phréatique rhénane. La bioréceptivité de pâtes de ciment (CEMI, CEMIII et CEMV) dans la nappe phréatique a été mise en évidence, les biofilms formés n'étant pas identiques notamment en ce qui concerne la présence de BSR. Les essais sont actuellement prolongés pour déterminer l'agressivité des différents microorganismes et la résistance de chacune des nuances de ciment.

3. Protection des structures en béton armé à l'aide de métabolites bactériens

La protection des ouvrages en béton armé grâce à des substances éco-respectueuses est un nouvel axe de recherche et développement en accord avec les nouvelles considérations d'éco-conception. Le béton sain, d'un pH de l'ordre de 13, constitue un environnement protecteur pour les armatures en acier qui sont protégées par une couche d'hydroxydes de fer $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et d'hydroxydes de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Baroghel-Bouny et al., 2008). Avec le temps, la physicochimie du milieu environnant les armatures peut évoluer et ainsi présenter des conditions propices à leur corrosion du fait du processus de carbonatation qui entraîne une dégradation du film passif des armatures (Chang et al., 2006; Johannesson et al., 2001; Wiktor, 2008) ou de la diffusion d'ions chlorure à travers le réseau poreux et/ou le réseau de fissures de la matrice cimentaire (Ahmad, 2003; Waanders et al., 2003). Le processus de corrosion des armatures se décompose en deux étapes (Baroghel-Bouny et al., 2008): la pénétration des agents agressifs au cœur du matériau sans contact avec les armatures (temps d'incubation,) puis le temps de propagation qui correspond à la corrosion proprement dite des armatures qui se traduit par la formation de produits de corrosion expansifs et l'augmentation de la pression interne au matériau pouvant engendrer la fissuration de la matrice cimentaire.

Les substances extracellulaires polymériques (SEP) sont des biopolymères sécrétés par de nombreuses espèces bactériennes. Certaines SEP telles que les EPS 180 ont montré un rôle inhibiteur de la corrosion des aciers (Ferrari, 2008; Stadler et al., 2010). Cette étude vise à évaluer l'influence de l'utilisation d'EPS 180 comme adjuvant pour des bétons éco-respectueux sur la corrosion des armatures en acier. Des mesures de potentiel libre de corrosion et de spectroscopie d'impédance électrochimiques ont été effectuées sur des armatures enrobées dans deux pâtes de ciment (CEM I et CEM V) et plongées en eau de mer naturelle.

3.1. Matériel et méthodes

Les EPS 180 sont des exopolysaccharides ((1→3, 1→6)- α -D-glucan) naturels produits à partir du sucrose par l'enzyme glucansucrase GTF180 sécrétée par les bactéries *Lactobacillus reuteri* 180 (Van Leeuwen, 2007). Une solution d'EPS 180 de concentration 1,3 g/l a été considérée comme un adjuvant, sa teneur dans les échantillons a ainsi été limitée à 5% de la masse de ciment (NF EN 934-2). La proportion d'eau de la solution utilisable pour l'hydratation du ciment a été estimée à 50% du volume de solution. Des échantillons de pâtes de ciment armées ont été fabriqués à l'aide de deux bases cimentaires : un ciment Portland CEM I 42.5 R CE CPS (95.5% et de 4.5% de constituants secondaires) et un ciment composé CEM V/A (S-V) 32.5 N CE PM-ES CP1 (51% de clinker, de 23% de laitier de haut fourneau et de 26% de cendres volantes siliceuses). Les proportions de solutions d'EPS 180 utilisées pour la fabrication des échantillons sont respectivement de 0%, 0,5%, 1%, 2,5% et 5% de la masse de ciment. La procédure de fabrication est basée sur celle décrite par la norme EN 196-1 et adaptée aux pâtes de ciment. Les échantillons ont été moulés sous la forme de cubes de 2 cm d'arête dans des moules métalliques, les armatures munies d'un fil de cuivre ont été placées au centre des échantillons. Les armatures sont en acier C15 (0.15% C) de 8 mm de diamètre et de 22 mm de long. Leurs extrémités ont été polies et un fil de cuivre a été martelé et brasé à l'étain sur leur surface supérieure. Après le moulage les deux extrémités affleurantes des armatures ont été recouvertes d'un vernis isolant et la partie supérieure a été recouverte de silicone. Les échantillons ont ensuite été placés dans de l'eau de mer naturelle

Le potentiel libre (Open Circuit Potential – OCP) a été mesuré en fonction du temps à l'aide d'un multimètre de paillasse. L'électrode de référence utilisée est une électrode Ag-AgCl (EAg-AgCl/ESH=0,197V).

Les mesures de spectroscopie d'impédance électrochimique SIE ont été effectuées avec un montage se composant d'une cellule de mesure (contre-électrode en platine – électrode de référence Ag/AgCl – électrode de travail (échantillon)) protégée des perturbations extérieures par une cage de Faraday, d'un potentiostat (Solartron SI 1286) et d'un Analyseur de Réponse en Fréquence (Solartron SI 1255). Les échantillons ont été extraits du bassin d'eau de mer et plongés dans un bécher de 600ml

contenant de l’eau de mer naturelle prélevée dans le bassin en même temps que l’échantillon. Les mesures de SIE n’ont été débutées qu’à l’obtention d’un potentiel libre de corrosion stable. Le potentiel libre de corrosion de l’échantillon a ensuite été imposé à l’aide du potentiostat. Les paramètres de mesure de SIE son une amplitude de signal de $\pm 10\text{mV}$ par rapport au potentiel libre de corrosion et une gamme de fréquences de 100 kHz à 0.001 Hz avec 5 points de mesure par décade. Les courbes obtenues ont été analysées à l’aide du logiciel Zview®.

3.2. Résultats et discussion

Le Tableau 2 regroupe les valeurs du potentiel libre de corrosion stabilisé de chacun des échantillons.

Echantillon	CEM I				
Teneur en solution d’EPS	0%	0,5%	1%	2,5%	5%
OCP [V/Electrode Ag-AgCl]	-0,148	-0,069	-0,178	-0,193	-0,074
Echantillon	CEM V				
Teneur en solution d’EPS	0%	0,5%	1%	2,5%	5%
OCP [V/Electrode Ag-AgCl]	-0,554	-0,467	-0,456	-0,443	-

Tableau 2: OCP mesuré avant les mesures d’impédance

Au potentiel de corrosion, le courant de corrosion est nul, l’impédance cathodique est en parallèle avec l’impédance anodique. L’impédance anodique correspond à l’impédance de la couche passive de l’armature et peut être modélisée par CPE (constant phase element (Jorcin et al., 2006)). L’impédance cathodique correspond à la réaction de réduction de l’oxygène et est alors modélisée par une résistance de transfert de charge Rtc. Le circuit équivalent correspondant est représenté sur la Figure 3 et les paramètres correspondants sont donnés dans le Tableau 3, ceux-ci ont été obtenus à l’aide d’un logiciel d’ajustement.

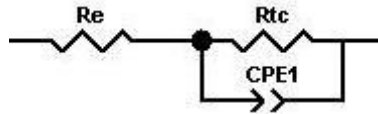


Figure 3 : Circuit équivalent utilisé : Rtc correspond à la branche cathodique et le CPE à la branche anodique

Echantillon	Re [Ω]	Rtc [Ω]	$Q[s^\alpha \cdot \Omega^{-1} \cdot cm^{-2}]$	α
CEM I 0%	1 050	553	0,000 14	0,86
CEM I 0,5%	870	4 284	0,000 13	0,89
CEM I 1%	2 200	2 476	0,000 11	0,79
CEM I 2,5%	870	1 305	0,000 15	0,87
CEM I 5%	1 240	13 300	0,000 11	0,85
CEM V 0%	660	58,4	0,000 32	0,76
CEM V 0,5%	1 690	719	0,000 23	0,815
CEM V 1%	3 100	616	0,000 23	0,785
CEM V 2,5%	1 270	497	0,000 25	0,83

Tableau 3: Paramètres correspondants au circuit équivalent de la Figure 3

Le potentiel libre de corrosion de l'acier C15 plongé quelques minutes dans l'eau de mer se stabilise à une valeur attendue de $-0,630$ V/ECS (environ $-0,7$ V/ECS pour des aciers faiblement alliés plongés en eau de mer naturelle (Dajoux et al., 2005)). Lorsque le C15 est enrobé dans les pâtes de ciment, la formation d'un film passif lié au pH et à la chimie des ciments engendre une augmentation de son potentiel libre de corrosion de 440 mV lorsqu'il est enrobé de CEM I et de 40 mV pour le CEM V. Les EPS 180 ne modifient pas significativement ces potentiels : $+80$ mV à -50 mV pour le CEMI et $+90$ mV à $+110$ mV pour le CEM V.

Quelle que soit la teneur en solution d'EPS 180 dans les échantillons d'une même nuance cimentaire, les paramètres caractéristiques du CPE

sont proches, par contre ces valeurs sont différentes d'un ciment à l'autre. Cela signifie que la couche passive formée dépend du ciment. A l'inverse, on observe une forte augmentation de R_{tc} pour les échantillons contenant des EPS 180 par rapport à ceux n'en contenant pas. Les EPS 180 ne semblent donc pas avoir d'influence importante sur la couche passive des armatures mais plutôt une influence sur la cinétique de réduction de l'oxygène. Cet effet sur la cinétique de la réaction cathodique apparaît dès les plus faibles concentrations en EPS, ce dernier point très bénéfique pour l'utilisation des EPS doit être précisé par des mesures complémentaires. Plusieurs études concernant le comportement des aciers inoxydables plongés en eau de mer naturelle ont montré l'influence des biofilms sur l'augmentation du potentiel libre de corrosion de ces aciers. Les enzymes contenues dans les biofilms ont notamment été identifiées comme capables de catalyser les réactions cathodiques (Dupont et al., 1998; Scotto et al., 1998).

3.3. Conclusion

Après une immersion en eau de mer naturelle, des mesures de potentiel libre de corrosion et de spectroscopie d'impédances électrochimiques ont montré que l'ajout d'EPS dans les gâchées de ciment induit une modification de la cinétique de la réaction cathodique des armatures enrobées dans deux pâtes de ciment. Ces premiers résultats sont prometteurs, l'utilisation de produits biologiques et écorespectueux comme adjuvants de bétons peut s'avérer un moyen écologique de protection des ouvrages en béton armé immergés dans des eaux naturelles.

Bibliographie

Ahmad, S., «Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction--a review». Cement and Concrete Composites, vol. 25, n°4-5, 2003, p.459-471.

Baroghel-Bouny, V., Capra, B., Laurens, S., 2008. La durabilité des armatures et du béton d'enrobage, In: Ollivier, J.-P., Vichot, A. (Eds.), La durabilité des bétons. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 303-385.

Chang, C.-F., Chen, J.-W., «The experimental investigation of concrete carbonation depth». *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n°9, 2006, p.1760-1767.

Dajoux, E., Malard, S., Lefevre, Y., Kervadec, D., Gil, O., «Influence des éléments d'alliage sur la corrosion d'acier faiblement alliés en eaux mer naturelles». *Matériaux et Techniques*, vol. 93, 2005, p.69-81.

De Belie, N., «Microorganisms versus stony materials: a love-hate relationship». *Materials and Structures*, vol. 43, n°9, 2010, p.1191-1202.

Dupont, I., Féron, D., Novel, G., «Effect of glucose oxidase activity on corrosion potential of stainless steels in seawater». *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 41, n°1, 1998, p.13-18.

Ferrari, G., 2008. EPS as corrosion inhibitors in coatings, protection of steel constructions, Combined Meeting of Working Groups 1 and 3 of COST Action D33, Preston, United Kingdom.

Gubner, R.J., Biofilms and accelerated low-water corrosion of carbon steel piling in tidal waters, Rapport de, 1998, University of Portsmouth.

Guillitte, O., «Bioreceptivity: A new concept for building ecology studies». *Science of the Total Environment*, vol. 167, n°1-3, 1995, p.215-220.

Johannesson, B., Utgenannt, P., «Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar». *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n°6, 2001, p.925-931.

Jorcin, J.-B., Orazem, M.E., PÈbÈre, N., Tribollet, B., «CPE analysis by local electrochemical impedance spectroscopy». *Electrochimica Acta*, vol. 51, n°8-9, 2006, p.1473-1479.

Magot, M., Mondeil, L., Ausseur, J., Seureau, J., 1988. Detection of Sulphate Reducing Bacteria In: Gaylarde, C.C.a.M., L.H.G., Eds. (Ed.), Proceedings of a Joint Meeting between the Biodeterioration Society and the French Microbial Corrosion Group Biodeterioration Society, Kew, UK, pp. 37-43.

Parker, C., «The corrosion of concrete, Isolation of species of bacterium associated with the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulfide.». *Australian Journal Experimental Biology Medical Science*, vol. 23, 1945, p.81-90.

Roux, S., Evaluation des risques de biodégradation des bétons en contact avec une eau douce naturelle, Rapport de Ph.D. Thesis, 2008, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

Roux, S., Bur, N., Ferrari, G., Tribollet, B., Feugeas, F., «Influence of a biopolymer admixture on corrosion behaviour of steel rebars in concrete». *Materials and Corrosion*, vol. 61, n°12, 2010, p.1026-1033.

Roux, S., Feugeas, F., Cornet, A., «Biodeterioration of mortars and cement paste studied using ESEM, STEM and EDS». *Microscopy and Analysis*, vol. 104, 2006, p.15-17.

Rouxhet, P., 2008. Interactions entre matériaux et systèmes biologiques, In: Cornet, A., Feugeas, F., Tribollet, B. (Eds.), *Biodétérioration des matériaux - Action des microorganismes de l'échelle nanométrique à l'échelle macroscopique*. Ellypse, Paris.

Scotto, V., Lai, M.E., «The ennoblement of stainless steels in seawater: a likely explanation coming from the field». *Corrosion Science*, vol. 40, n°6, 1998, p.1007-1018.

Stadler, R., Wei, L., Fürbeth, W., Grooters, M., Kuklinski, A., «Influence of bacterial exopolymers on cell adhesion of *Desulfovibrio vulgaris* on high alloyed steel: Corrosion inhibition by extracellular polymeric substances (EPS)». *Materials and Corrosion*, vol. 61, n°12, 2010, p.1008-1016.

Starkey, R.L., «The general physiology of the sulfate-reducing bacteria in relation to corrosion». *Producers Monthly*, vol. 22, 1958, p.12-16.

Van Leeuwen, S.S., Structural analysis of in vitro produced α -D-glucans : Biopolymers synthesised from sucrose by using native and engineered *Lactobacillus reuteri* glucansucrase enzymes, Rapport de Ph.D. Thesis, 2007, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.

Waanders, F.B., Vorster, S.W., «Concrete Infrastructure Corrosion». *Hyperfine Interactions*, vol. 148-149, 2003, p.237-242,.

Wiktor, V., Biodétérioration d'une matrice cimentaire par des champignons : Mise au point d'un test accéléré de laboratoire, Rapport de, 2008, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Saint-Etienne (France).

Wiktor, V., Jonkers, H.M., «Un nouveau béton auto-cicatrisant grâce à l'incorporation de bactéries». *Matériaux et Techniques*, vol. 99, n°5, 2011, p.565-572.

Yamanaka, T., Aso, I., Togashi, S., Tanigawa, M., Shoji, K., Watanabe, T., Watanabe, N., Makic, K., Suzuki, H., «Corrosion by bacteria of concrete in sewerage systems and inhibitory effects of formates on their growth». *Water Research*, vol. 36, n°10, 2002, p.2636-2642.

Mini CV et photo de tous les auteurs



Sébastien Roux est ingénieur en mécanique et Maître de Conférences l'Université de Lorraine dans le département génie civil de l'IUT de Nancy Brabois. Après un DEA en mécanique et ingénierie, il a préparé son doctorat sous la direction des Pr. Alain Cornet et Françoise Feugeas (INSA de Strasbourg - Université de Strasbourg) dans le domaine de la biodétérioration des bétons. Membre de l'équipe matériaux pour le génie civil de l'Institut Jean Lamour (IJL-UMR 7198), son travail est axé sur la durabilité du béton et l'influence des micro-organismes et de leur métabolites.



André Lecomte est professeur à l'Université de Lorraine dans le département génie civil de l'IUT Nancy Brabois. Il est à la tête de l'équipe Matériaux pour le génie civil de l'Institut Jean Lamour (IJL-UMR 7198). En 1989, il a soutenu sa thèse «La modélisation fractale et l'écoulement dans les fractures" sous la direction du professeur Alain Thomas. Ses domaines de recherche actuels se concentrent autour des liants hydrauliques et matériaux composites, la formulation et la durabilité du béton, liants alternatifs et industrielle de valorisation des co-produits



Françoise Feugeas est ingénieur en civil et professeur à l'INSA de Strasbourg. Après une thèse de doctorat en 1998, elle a dirigé une équipe et développé l'axe de recherche «Matériaux Biodeterioration". Depuis le début de l'année 2013, elle est chef de l'équipe d'ingénierie civile du laboratoire incubé. Elle est également présidente de la commission «biodétérioration des matériaux» du CARACO depuis Novembre 2011 et le coordinateur du projet de SEPOLBE (ANR CD2I 2012) et co-responsable de l'axe transversal «Ingénierie des Matériaux pour l'énergie et l'environnement (IMEE)" transversal de iCube.

Sensibilité et limite de détection de micro capteurs RMN: Aspects méthodologiques

L. Fakri-Bouchet^{1, 2}; D. M. Hoang^{1,3}; A. Kadjo^{1,4}; T. Cong Truong¹; Y. Zaim Wadghiri³; D. Graveron-Demilly¹.

¹Université de Lyon, INSA de Lyon, CREATI, CNRS UMR 5220, INSERM U1044, 69622, Villeurbanne, France.

²IUT de Lyon Site Gratte-Ciel, 17 rue de France, 69100 Villeurbanne, France.

³Université de New York, Polytechnique de HCM ville, Ho Chi Minh Ville, Vietnam.

⁴ESIEE Paris, 2 Bd Blaise Pascal, 93162 Noisy Le Grand, France.

latifa.bouchet@univ-lyon1.fr

Sections de rattachement : 63^{ème}

Secteur : Secondaire

Thème : Pluridisciplinarité

RÉSUMÉ. L'analyse de micro-volumes par spectroscopie RMN impose de fixer plusieurs critères de performance qui permettront de déterminer la faisabilité d'une manipulation donnée en utilisant une microantenne donnée.

Dans ce travail nous avons traité la question importante de la limite de détection sous un angle théorique. L'intérêt de cette analyse est qu'elle permet de définir sur le plan pratique la méthodologie nécessaire à l'évaluation des performances d'un micro-capteur. Sur le plan formel il est proposé d'adopter une limite de détection standard qui permet de comparer entre elles différentes structures utilisées pour la détection du signal.

Cette analyse est fondée sur une adaptation des critères de performance définis par Lacey et al [Lacey et al 1999] et établis comme « figures de mérite » en micro-spectroscopie RMN. Ces paramètres sont la sensibilité en fonction de la masse, sensibilité en fonction de la concentration, limite de détection en fonction de la masse et limite de détection en fonction de la concentration.

MOTS-CLÉS : Micro-antennes, Spectroscopie RMN (SRM) localisée, métabolites cérébraux, sensibilité en fonction de la concentration S_c en fonction de la masse S_m , Limites de détection LOD.

Introduction

L'emploi de micro-antennes utilisées pour la réception du signal RMN a été imaginé par Paul Lauterbur. Elles étaient destinées à l'observation de petits objets car son laboratoire avait engagé des travaux de microscopie par IRM dès les années 1980 [Hedges 1984]. Le concept a été ensuite repris par T. Peck [Peck *et al.* 1994], A. Webb [Webb *et al.* 1996] en particulier et également développé à l'Ecole Polytechnique de Lausanne [Massin *et al.* 2003, Ehrmann *et al.* 2006]. Un des premiers exemples de micro-antenne de structure planaire à visée spectroscopique a été envisagé dans notre laboratoire [Armenean 2002]. Notre modèle a été élaboré dans le cadre de collaborations extérieures. L'utilisation effective de ce type de micro antennes submillimétriques a été réalisée *in vitro* par N. Baxan avec succès [Baxan 2008] puis les premiers essais *in vivo* dans la thèse d'A. Kadjo [A.Kadjo 2011]. Ces derniers travaux de thèse ont montré qu'une évaluation des performances de ces microantennes s'imposait car il est bien connu que le passage d'expériences *in vitro* à des mesures *in vivo* est souvent la source de déconvenues.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les performances de micro-bobines, à travers la question importante de la limite de détection sous un angle théorique. L'intérêt de cette analyse est qu'elle permet de définir sur le plan pratique la méthodologie nécessaire à l'évaluation des performances d'un micro-capteur. Sur le plan formel il est proposé d'adopter une limite de détection standard qui permet de comparer entre elles différentes structures utilisées pour la détection du signal. On verra que cette nouvelle notion permet également de qualifier une installation de spectroscopie (capteur associé à un spectromètre pour une expérience donnée). Ainsi, nous avons étudié l'amélioration apportée sur de la limite de détection par la méthode de traitement du signal, la pondération, et la validé sur des mesures expérimentales spectroscopiques.

Les termes anglo-saxons de *detection limit*, *lower limit detection*, *limit of detection* (LOD) sont considérés comme équivalents et indiquent la plus faible quantité de substance (masse ou concentration) qui peut être mise en évidence par comparaison. On peut considérer donc que la limite de détection est tirée de la comparaison de la distribution d'une série de mesures « à blanc » (*blank measurements*) d'une part et d'autre part une série de mesures effectuées en présence de la substance étudiée.

La notion de limite de détection (LOD), d'origine statistique, dont la définition est donnée dans le *Compendium of Chemical Terminology* de l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) [McNaught *et al.* 1997] s'adresse à l'analyse chimique, donc aussi à la spectroscopie RMN.

Le rapport signal sur bruit d'amplitude [Ernst *et al.* 1966] qui existe - dans le cas d'un spectre - entre la hauteur du pic et l'amplitude quadratique moyenne du bruit de fond permet de définir la limite de

détection en concentration comme étant la concentration qui permet un rapport signal sur bruit d'amplitude (SNR_f) égal à 3 dans le domaine fréquentiel puisqu'en RMN c'est dans ce domaine que l'on est capable de percevoir et de comprendre l'information.

Dans un compte rendu dédié à l'investigation analytique par microsondes RMN, Lacey et al. [Lacey et al. 1999, Webb *et al.* 2005, Olson et al. 199 et 2004] avaient défini comme indicateurs de performance la sensibilité vis-à-vis de la concentration ou bien la sensibilité vis-à-vis de la quantité de matière ou sensibilité molaire qui s'écrivent respectivement :

$$S_c = \frac{SNR_f}{C} \quad \text{et} \quad S_m = \frac{SNR_f}{mol}$$

où C représente la concentration (en mole/kg), m la masse de soluté (kg) et mol le nombre de moles de soluté. Ces définitions ont été reprises par Massin et al [Massin et al 2003] en les rapportant à une seule acquisition, donc en les définissant de la manière suivante :

$$S_c = \frac{SNR_f}{C \cdot \sqrt{N_{acc}}} \quad \text{et} \quad S_m = \frac{SNR_f}{mol \cdot \sqrt{N_{acc}}}$$

Il est également possible de rapporter ces notions de sensibilité à la durée occupée par l'expérience en adoptant une troisième option :

$$S_c = \frac{SNR_f}{C \cdot \sqrt{T_{exp}}} \quad \text{et} \quad S_m = \frac{SNR_f}{mol \cdot \sqrt{T_{exp}}}$$

La limite de détection sera alors définie comme étant la concentration (ou le nombre de moles) qui au cours d'une expérience, permet d'atteindre la valeur 3 pour SNR [IUPAC 1997, Curie 1999]. On peut la rapporter à l'expérience complète, à une seule acquisition, ou à l'unité de temps, comme le montrent les formules ci-dessus.

Dans chacun de ces cas ou on peut enfin utiliser soit une limite de détection en concentration obtenue de la façon suivante :

$$S_c = \frac{SNR_f}{C} = \frac{3}{LOD_c}$$

$$LOD_c = \frac{3 \cdot C}{SNR_f} \quad \text{de même,} \quad LOD_m = \frac{3 \cdot mol}{SNR_f}$$

Il est possible de normaliser ces quantités soit en tenant compte du nombre d'acquisitions, en tenant compte de la durée des expériences. Nous avons opté pour la première solution dans ce qui suit :

$$nLOD_c = \frac{3 \cdot C}{SNR_f} \sqrt{N_{acc}} \quad nLOD_m = \frac{3 \cdot mol}{SNR_f} \sqrt{N_{acc}}$$

$$nLOD_c = \frac{3 \cdot C}{SNR_f} \sqrt{T_{exp}} \quad nLOD_m = \frac{3 \cdot mol}{SNR_f} \sqrt{T_{exp}}$$

C'est dans le but de déterminer la limite de détection des antennes mises en œuvre que nous proposons l'étude expérimentale suivante. Par la suite de cet article, nous travaillerons essentiellement avec LODc.

1. Moyens et Méthodes

1.1 Micro capteur RMN implantable

La partie active de notre micro antenne (Figure I) a été choisie de telle manière à avoir des dimensions comparables à celles de la zone d'intérêt (afin de maximiser le facteur de remplissage et par conséquent le rapport signal sur bruit). Elle est prolongée par des contacts électriques permettant son implantation en profondeur. La bobine que nous proposons ici comporte 4 spires ellipsoïdales de $22\text{ }\mu\text{m}$ de large pour $50\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur. L'espace interspires est de $20\text{ }\mu\text{m}$. Elle s'étend sur $500\text{ }\mu\text{m}$ de large pour $1000\text{ }\mu\text{m}$ de long. Cette bobine, constituant la partie sensible de la sonde, est prolongée par 3 pistes de plus de 9 mm de long. La piste centrale sera reliée au point central de la bobine (wire bonding) tandis que les deux autres pistes constituent la masse de l'antenne. Cette micro antenne a été fabriquée par électrodéposition de $38\text{ }\mu\text{m}$ de cuivre sur un substrat de verre de $500\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur [Baxan 2006; 2008, Kadjo 2008; 2009; 2010; 2011].

La Figure I, représente la micro bobine associée au circuit d'accord, d'adaptation, et au système de découplage actif. Ce circuit occupe une dimension de $13\times 14\text{ mm}$ (PCB FR4), sur lequel se trouve des condensateurs fixes amagnétiques ATC et des condensateurs variables en technologie CMS (AVX, CTZ3 séries), une diode PIN (BAP64). La sortie de signal ainsi que la commande de découplage sont assurées par deux micro-connecteurs (HRS, UFL séries).

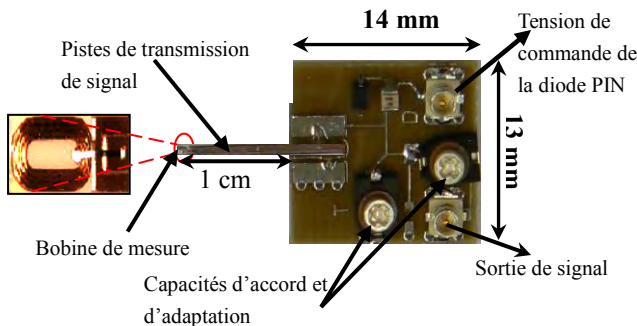


Figure I : Photographie de la micro-antenne associée au circuit d'accord et d'adaptation ainsi que le système de découplage actif représenté par une diode PIN.

1.2 Etude du champ effectif de la micro-bobine « race-track ».

Pour évaluer la sensibilité spatiale de la micro bobine et ses performances en termes de limite de détection, le champ magnétique créé peut être modélisé de façon approchée en utilisant un modèle filaire à partir du schéma de la Figure II.

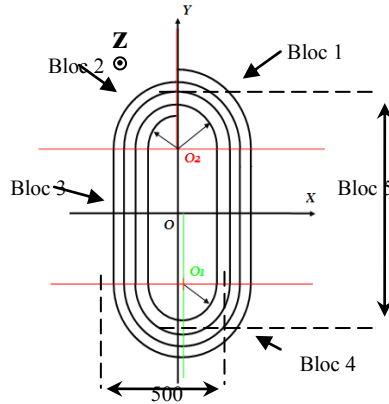


Figure II: *Forme schématique de la micro bobine, les arrivées et départs du courant ne sont pas représentés ici. L'axe OZ utilisé est perpendiculaire au plan de la figure et pointe vers le lecteur. Le calcul a été décomposé et réparti selon les cinq ensembles (blocs) de lignes de courant.*

1.3 Représentations du champ magnétique

Le champ détecteur se compose de trois composantes B_z , B_x et B_y . Nous supposons toujours que l'axe de volume du cube observé, se trouve sur l'axe Z de la micro-bobine, et par conséquent l'échantillon sera symétrique par rapport à l'axe révolutionnaire de la micro bobine. L'orientation de la micro bobine selon une direction donnée, par rapport au champ statique B_0 , comme par exemple l'orientation du petit axe OX (Figure II) se fera selon la direction du champ statique B_0 . Les composantes des champs détecteurs seront ainsi B_z et B_y (composantes qui se trouvent dans le plan perpendiculaire à B_0).

Afin d'illustrer la cartographie du champ de détection obtenue en IRM, nous présentons les images acquises par la micro antenne plongé dans une solution d'eau physiologique dans les trois directions, ainsi que les résultats correspondants obtenus par la simulation sous MatLab (Figures III).

Afin d'évaluer les performances de notre micro antenne par rapport aux autres types d'antennes détectrices, nous avons effectué une étude

comparative entre celle-ci une antenne détectrice commerciale du laboratoire.

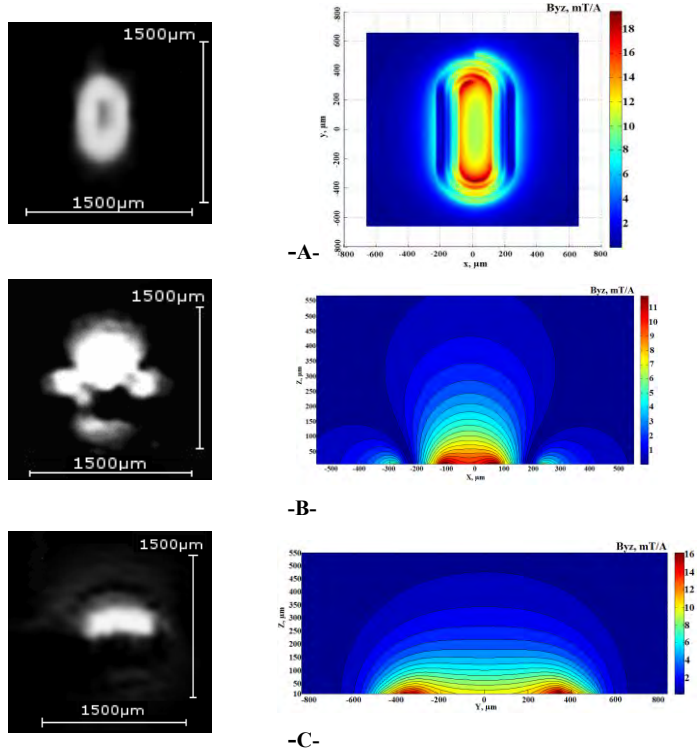


Figure III: Représentation les images obtenues en IRM de la micro-antenne (à gauche) vis-à-vis des modules des composantes effectives $\sqrt{B_x^2 + B_y^2}$ déterminées par la simulation à 10 μm au-dessus du conducteur (à droite), le champ statique B_0 est orienté selon le petit axe x de la micro-antenne. Champ effectif représenté dans le plan XOY (A), dans le plan XOZ (B) et dans le plan YOZ (C).

1.4 Evaluation de la limite de détection de la micro-antenne « race track »

Le volume examiné est excité par la technique de spectroscopie localisée PRESS qui permet, dans notre cas de définir différents volumes cubiques de (1; 3,375; 8; 27; 64) mm^3 à l'intérieur desquels les aimantations seront basculées d'un angle de 90° .

Le positionnement de l'antenne et sa taille par rapport à ce volume d'excitation jouent évidemment un rôle essentiel.

Pour en tenir compte nous proposons deux calculs de la limite de détection: le premier effectué lorsque le volume excité est « posé » sur le plan de l'antenne (Figure IV.4 (a) et (b)).

Une seconde analyse est effectuée dans le cas où la bobine est plongée carrément dans le volume excité, dans ce cas il faut tenir compte de la réponse effectuée de part et d'autre de la micro bobine tout en éliminant le volume occupé par l'antenne dans le volume exploré.

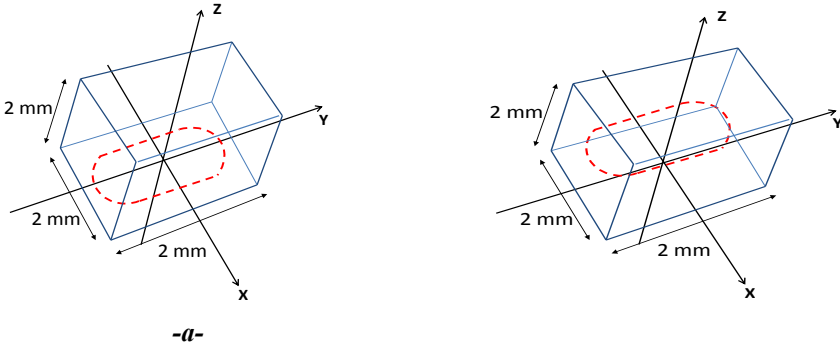


Figure IV: Représentation du volume

PRESS dans le repère OXY utilisé pour caractériser la micro-antenne. Géométrie employée pour le calcul de la limite de détection. -a- Volume cubique excité reposant par une de ses faces sur un plan parallèle à celui de la micro-bobine « plaquée » contre le volume examiné. -b- Volume cubique excité pénétré par la micro-bobine « plongée » dans ce volume.

Dans cette partie nous nous sommes intéressés à l'influence de la taille de la micro bobine par rapport au volume d'excitation. Nous avons étudié la variation portée sur les résultantes (en termes de SNRt et de la limite de détection LODc) en changeant les dimensions de cette microbobine. Nous avons analysé le cas où la micro bobine a été fabriquée avec des dimensions doublés, ce qui nous a conduit à définir le terme petite *race track* et grande *race track* :

- Petite *race track* : c'est le modèle de base qu'on dispose actuellement, (Figure I) possède les dimensions: longueur 1000 μm , largeur 500 μm et une résistance équivalente 1,27 ohms.
- Grande *race track* : possède des dimensions doublé par rapport à celle la petite *race track*, avec : longueur 2000 μm , largeur 1000 μm et une résistance équivalente de $2 \times 1,27 = 2,54$ ohms.

2. Résultats

2.1 Etude expérimentale

Elle est réalisée à partir d'expériences effectuées sans introduction du préamplificateur faible bruit, en utilisant la séquence spectroscopique PRESS (durée d'acquisition 1000, 500 et 250 ms, largeur spectrale 4 kHz, nombre de points 4025, 2048 et 1024, $N_{acc}=1$; 8). Ces temps d'acquisition sont choisis de façon à ce qu'ils soient relativement longs par rapport au temps de décroissance du signal (généralement inférieur à 150 ms).

Le travail effectué, a consisté à déterminer, à partir des enregistrements, les données suivantes qui apparaissent dans le Tableau I ($T_{acq}= 500$ ms et $N_{acc}= 1$ et 8) et qui sont :

- Le rapport signal sur bruit mesuré dans le domaine temporel (convention Ernst).
- Le rapport signal sur bruit mesuré dans le domaine fréquentiel (convention Ernst).
- Le rapport entre ces deux grandeurs,
- La limite de détection (en concentration) ramenée à un seul noyau (protonique) en utilisant la relation $LOD_c = \frac{3 \times 111}{SNRf}$ (l'échantillon étant

considéré comme de l'eau pure donc à 111 mol/kg équivalent proton).

- La relation entre le rapport signal sur bruit temporel obtenu par modélisation et le rapport signal sur bruit temporel observé sur l'acquisition.

- La valeur LOD_C standard ($T_{acq}= 500$ ms, $T_2^* = 100$ ms et prenant en compte la valeur du SNR_t théorique).

Tacq≈ 0,5 s	Sans accumulation.	8 accumulations
FID Amplitude	100000	800000
bqmt.	1217	3922
SNRt	82	204
Spectre Amplitude.	360000	3000000
bqmf	1171	3667
SNRf	307	818
SNRf/SNRt	3,7	4,16
LODc (1 proton.)	1,085	1,15

Tableau I : Analyse des données pour la mesure de LOD_c sans ou avec accumulation (on rappelle que $\sqrt{8} \approx 2,83$). La transformation de Fourier normalisée utilisée est telle que le niveau de bruit doit rester le même dans les deux domaines d'où l'égalité (approximative) de bqmt et bqmf, valeurs quadratiques moyennes de bruit dans les domaines temporel et fréquentiel.

Pour nos expérimentations *in vitro*, l’antenne commerciale a été posée sur un fantôme qui simule une tête du rat, rempli avec solution de métabolites cérébraux de concentration connue.

Différents volumes ont été sélectionnés (Tableau II) à l’aide de la séquence de spectroscopie localisée PRESS à une profondeur de l’ordre de 1 cm à partir de la surface de l’antenne, ce qui permet de simuler la situation *in vivo* (observation du LDT (Latero Dorsal Tegmental nucleus) situé à 1cm dans le cerveau à partir du cortex). Cette antenne a aussi été utilisée pour effectuer les mesures *in vivo* à l’aide du même imageur RMN à 4,7T.

LODc protonique (mmol/kg) V_E (mm³)	Cr (3,91ppm)	Cho (3,18ppm)	Cr (3,02ppm)	Naa (2ppm)	LODc Moyenne ±écart type
3.375	128	148	141	143	152,86±16,0

Tableau II : Résultats de mesures effectuées à l’aide de la micro-antenne sur une solution des métabolites pour différents volumes observés (seul 1 exemple est rapporté ici). Sur ce tableau les valeurs de la limite de détection protonique. Les valeurs moyennes issues de toutes les séries d’expériences (non reportées ici) sont indiquées dans la dernière colonne.

(A) **Mesures effectuées *in vitro* sur des solutions de métabolites de concentrations connues dans du liquide physiologique:** Une série d'expériences réalisées à l'aide de la micro-antenne et de l'antenne commerciale, conduit à la comparaison présentée sur la Figure V.

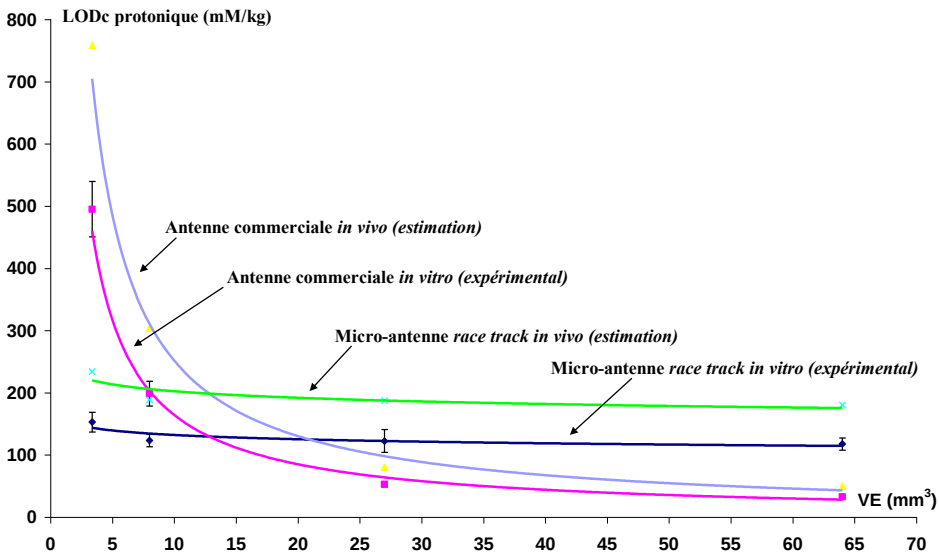


Figure V: Limites de détection protonique mesurées *in vitro* et estimées *in vivo* pour l'antenne commerciale et la micro-antenne en fonction des différents volumes observés.

(B) **Mesures effectuées *in vivo* sur le cerveau d'un rat sain:** Une série d'expériences *in vivo* a été réalisée sur des cerveaux de rats « Wistar » de façon à déterminer la sensibilité de l'antenne commerciale utilisée dans ces conditions. Les expériences ont été effectuées sur un voxel de dimensions 4x4x4 mm³ situé dans la région du LDT.

Les résultats sont récapitulés sur le tableau III.

LODc protonique (mmol/kg)	Cho	Cr	Naa
Rat 1	(35,90±2,6) x C	(9,55 ±0,1) x C	(7,86 ±0,5) x C
Rat 2	(26,64±1,2) x C	(6,95 ±0,4) x C	(6,65 ±0,1) x C
Rat 3	(35,89±2,1) x C	(9,66 ±0,6) x C	(9,78 ±0,7) x C

Tableau III : Limites de détection protonique *in vivo* du cerveau du rat $V_E= 4\times4\times4\text{ mm}^3$ au niveau de LDT en fonction de la valeur locale de la concentration (C) propre à chaque métabolite.

3. Conclusion et Discussion

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux performances de la micro-antenne « *race track* » utilisée pour nos expérimentations, en ce qui concerne particulièrement sa sensibilité et sa limite de détection en fonction de différents volumes observés. Une comparaison théorique, faite par la modélisation, a été effectuée entre le modèle de micro-antenne dont on dispose actuellement (petite *race track*: $1000*500\ \mu\text{m}$) avec d'autres modèles proposés (grande *race track*: $2000*1000\ \mu\text{m}$ et une antenne commerciale : antenne de surface utilisée pour le proton ^1H , ($\Phi = 4.2\text{cm}$), dédiée à l'imagerie et la spectroscopie de cerveau de rat, associée à un préamplificateur faible bruit). Une bonne corrélation a été observée entre les résultats expérimentaux *in vitro* et ceux obtenus par la modélisation de la micro antenne.

Ces résultats montrent que la grande bobine *race track* présente un plus fort SNR_t et donc une plus petite LOD_c par rapport à la petite micro-bobine. Cette amélioration est de l'ordre de 3 pour des volumes qui sont supérieurs à $3\ \text{mm}^3$, mais pour des volumes plus petits, de l'ordre de $0,125\ \text{mm}^3$, le résultat est quasi identique (Figure V).

D'autre part, nous avons remarqué que le fait de plonger micro-bobine *race track* dans le voxel, apporte une faible amélioration par rapport au cas où la micro-bobine est positionnée contre ce voxel : d'un facteur de 1,2 dans le cas d'une petite *race track*, et un facteur de 1,4 dans le cas d'une grande *race track*.

Enfin il est important de remarquer que la limite de détection théorique de ces deux modèles analysés dépend assez peu du volume d'échantillon (pour des volumes supérieurs à $8\ \text{mm}^3$). Ceci est normal en raison du confinement de la sensibilité au voisinage du capteur.

Avec cette étude nous montrons l'intérêt de la micro-antenne pour examiner des petits volumes (inférieures à $10\ \text{mm}^3$), et l'avantage offert par ce dispositif (facteur de gain de l'ordre de 2) pour détecter des métabolites dans une petite région anatomique (LDT).

A travers l'étude comparative avec l'antenne commerciale, nous pouvons constater deux faits importants :

(1) Les comportements des deux variations de LOD_c sont différents : la LOD_c de l'antenne commerciale varie fortement en fonction du volume du voxel examiné [$500\ \text{mmol/kg}$ à $4\ \text{mm}^3$ et $30\ \text{mmol/kg}$ à $64\ \text{mm}^3$]. Conformément à ce qui a déjà été observé par modélisation, la variation de la limite de détection de la micro-antenne est beaucoup moins marquée et elle se situe dans une plage étroite au-dessus de $100\ \text{mmol/kg}$.

(2) Le point de croisement des deux courbes montre l'intérêt qu'il y a à utiliser la micro-antenne pour observer un volume inférieur à $12\ \text{mm}^3$. En particulier, pour un échantillon de $8\ \text{mm}^3$, on obtient une LOD_c de 200

mmol/kg pour l'antenne commerciale contre 120 mmol/kg pour la micro-antenne.

Références

Armenean M., Spectroscopie et imagerie de faibles volumes par RMN : conception et optimisation de capteurs radiofréquence implantables et endoluminaux, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2002.

Baxan N., Mise en œuvre de micro-antenne RMN en perspective d'étude in vivo de métabolites par spectroscopie. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon1, 2008.

Baxan N., J. F. Chateaux, A. Rengle, H. Rabenson, A. Briguet, G. Pasquet, P. Morin, et L. Fakri-Bouchet, "NMR implantable probe: limit of metabolites detection", in ProRISC, 17th Annual Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing, Veldhoven, The Netherlands, p. 125 - 131, 2006.

Baxan N., H. Rabeson, G. Pasquet, J.-F. Châteaux, A. Briguet, P. Morin, D. Graveron-Demilly, et L. Fakri-Bouchet, "Limit of detection of cerebral metabolites by localized NMR spectroscopy using microcoils", Comptes Rendus Chimie, vol. 11, no 4-5, p. 448-456, 2008.

Currie L. A., "Detection and quantification limits: origins and historical overview", *Analytica Chimica Acta* 391, 127-139, 1999.

Ehrmann K., Gersbach M., Pascoal P., Vincent F., Massin C., Stamou D., Besse P.A., Vogel H., Popovic R. S., Sample patterning on NMR surface microcoils, *Journal of Magnetic Resonance*, 178, 96-105, 2006.

Ernst R.R., Anderson W.A., Application of Fourier Transform Spectroscopy to Magnetic Resonance, *Review of Scientific Instruments*, 37(1), 93-102, 1966.

Hedges L.K., Microscopic Nuclear Magnetic Resonance Imaging, PhD thesis, Department of Physics, State University of New York at Stony Brook, 1984.

IUPAC Compendium of Chemical Terminology, second ed., 1997.

Kadjo A., N. Baxan, A. Briguet, D. Graveron-Demilly, L. Fakri-Bouchet, R. Cespuglio, et C. Rousset, "In vivo animal NMR studies using implantable micro coil", in IEEE Imaging Systems and Techniques, p. 294-296, 2008.

Kadjo A., N. Baxan, R. Cespuglio, A. Briguet, C. Rousset, M. Dung-Hoang, D. Graveron-Demilly, et L. Fakri-Bouchet, "In vivo animal NMR studies using implantable micro-coil", in ISMRM, 17th Scientific Meeting and Exhibition, Honolulu, USA, p. 4275, 2009.

Kadjo A., J. C. Brisset, M. Dung-Hoang, P. Poulichet, C. Rousset, A. Fakri, Y. Z. Wadghiri, M. Wiart, L. Rousseau, R. Cespuglio, A. Briguet, D. Graveron-Demilly, et L. Fakri-Bouchet, "Biocompatibility of implantable micro-coil

dedicated for In vivo animal NMR studies”, in ISMRM, 18th Scientific Meeting and Exhibition, Stockholm, Sweden, 2010.

Kadjo A., Micro-capteurs implantables: Etude des critères de performance en vue de l’optimisation des acquisitions par Spectroscopie RMN *in vivo*. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon1, 2011.

Lacey M. E., Subramanian R., Olson D. L., Webb A. G., Sweedler J. V., HighResolution NMR Spectroscopy of sample volumes from 1 μ L to 10 μ L, Chemical Review, 99, 3133-3152, 1999.

Massin C., Vincent F., Homsy A., Ehrmann K., Boero G., Besse P. A., Daridon A., Verpoorte E., De Rooij N. F., Popovic R. S., Planar microcoil-based microfluidic NMR probes, Journal of Magnetic Resonance, 164, 242-255, 2003.

Mc Naught A.D., Wilkinson A., IUPAC, Compendium of Chemical Terminology. 2nd, “The Gold Book”, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1997.

Olson D. L., Lacey M. E., Webb A. G., Sweedler V., “Nanoliter-Volume ¹H NMR Detection Using Periodic Stopped-Flow Capillary Electrophoresis”, *Analytical Chemistry* 71, 3070-3084, 1999.

Olson D. L., Norcross J. A., O’Neill-Johnson, Peck T. L., “Microflow NMR: Concepts and Capabilities”, *Analytical Chemistry* 76, 2966-2978, 2004.

Peck T.L., Magin R.L., Kruse R., Feng M. NMR microspectroscopy using 100 μ m planar RF coils fabricated on gallium arsenide substrates, IEEE Transactions Biomedical Engineerig, 41,7, 706-709, 1994.

Webb A. G., Grant S. C., Signal-to-noise and magnetic susceptibility trade-offs in solenoidal microcoils for NMR, Journal of magnetic resonance B, 113, 83-87, 1996.

Webb A.G., “Microcoil nuclear magnetic resonance spectroscopy”, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 38, 892-903, 2005.



L. Fakri-Bouchet: Maître de Conférences (HDR) au Laboratoire CREATIS, INSA, Université Lyon1 et à l'IUT de Lyon, France. Elle a obtenu sa thèse de Doctorat (1996) spécialisé en Electronique et en Instrumentation RMN à l'Université Lyon 1 et au laboratoire RMN-MIB.

Ses activités de recherche sont axées sur la conception assistée par ordinateur, le développement de microsystèmes actifs à base de micro-sonde RMN.

Ses intérêts de recherche incluent également des applications précliniques *in vivo* portant sur l'étude des maladies neurodégénératives et plus particulièrement la maladie d'Alzheimer.



D. M. Hoang : Après l'obtention de son Baccalauréat à Ho Chi Minh Ville (Vietnam), il a intégré l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse où il a obtenu son Diplôme d'Ingénieur en Micro-Electronique en 2008 et son Master Recherche spécialité : Dispositifs électroniques intégrés en 2009. Actuellement, il prépare son diplôme de doctorat en cotutelle avec l'Université de New York (NYU). Son sujet porte sur l'Instrumentation RMN dédiées à l'Imagerie, la Micro-Imagerie par Résonance Magnétique (IRM et μ IRM), et l'imagerie moléculaire.



A. Kadjo: Né en Mars 1979 à Alep, en Syrie. Ingénieur en Electronique de l'Université d'Alep en 2001. Diplômé du Master : Dispositifs électroniques intégrés de l'INSA de Lyon.

En Novembre 2011, il a obtenu son doctorat en Electronique et Instrumentation RMN (Antennes et micro-antennes Radiofréquence) au Laboratoire CREATIS, INSA, Université Lyon 1, France.

Depuis Janvier 2012, il est Maître des Conférences à l'Université d'Alep, en Syrie.



T. Cong Truong: Ingénieur Mécatronique de l'Ecole polytechnique d'Ho Chi Minh Ville (Vietnam). Lauréat d'une bourse du Gouvernement Vietnamien, actuellement, il prépare son diplôme de doctorat en Micro et nano technologie et plus particulièrement sur le développement de microsystèmes appliqués à l'instrumentation RMN au Laboratoire CREATIS, INSA, Université Lyon 1, France.



Y. Zaim Wadghiri: Après son Doctorat obtenu à l'Université de Lyon1 en 1994, il a effectué un Post-Doctorat de 1996-1997 à Dartmouth Medical School-NH (USA). Actuellement il est Assistant Professeur à la Medical School of New York et à l'Université de New York (NYU).

Ces travaux de Recherches portent sur l'Imagerie et la Micro-Imagerie par Résonance Magnétique (IRM et μ IRM), l'imagerie moléculaire et cellulaire, les agents de contraste, Modèles animaux de maladies neurodégénératives .



D. Graveron-Demilly: Ingénieur de Recherche Hors Classe - Dr. es Sciences, Dr. Ingénieur, Ingénieur INSA - elle a exercé ses activités au Laboratoire de RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) de l'Université Claude Bernard-Lyon 1, UMR CNRS 5012, de 1968 à 2006, puis à CREATIS, UMR CNRS 5220, et Inserm U1044 depuis 2007. Elle est internationalement reconnue pour ses travaux méthodologiques en Spectroscopie et en Imagerie de Résonance Magnétique (SRM et IRM).

Architecture bilatérale pour un système de télé-échographie robotisé avec un retour d'effort

Juan Sebastián Sandoval, Laurence Josserand, Cyril Novales, Aicha Fonte, Pierre Vieyres

IUT Bourges – Université d'Orléans

Laboratoire PRISME

Avenue de Lattre de Tassigny, 18020 Bourges

Pierre.vieyres@univ-orleans.fr

Sections de rattachement : 61
Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ. Depuis 1995, l'équipe robotique du Laboratoire PRISME de l'Université d'Orléans étudie et développe des systèmes de robots pour la télé-échographie afin de permettre la réalisation d'un diagnostic à distance, rapide et fiable pour les patients habitant des régions médicalement isolées. Ces systèmes ont été validés cliniquement lors de nombreuses phases pilotes réalisées par le CHU de Tours. En 2009, le Laboratoire PRISME a développé sous accord de licence d'exploitation avec la société AdEchoTech, un robot de télé-échographie appelé Melody. En 2011, sur la continuité de ce partenariat, PRISME a développé un nouveau robot *Protech*, sur la base mécanique de Melody et complété d'un degré de liberté supplémentaire pour permettre une translation active du point de contact sonde/peau, afin de contrôler l'effort appliqué par la sonde sur le corps du patient. Lors de l'exécution d'un acte de télé-échographie robotisée via des réseaux de communication ceux-ci introduisent des retards variables qui perturbent la stabilité et la transparence de la chaîne télé-opérée. Pour garantir la transparence du geste à distance et rendre compte des interactions homme/robot à distance, une nouvelle architecture de commande basée sur un modèle interne fournissant une valeur prédite de la raideur de l'environnement lointain a été développée. Cette approche permet d'améliorer, sur le site de l'opérateur, le rendu des interactions entre le robot distant et son environnement (ici le patient), et le contrôle de l'orientation du robot. Cette stratégie fournit à l'expert médical un outil interactif pour reproduire son geste à distance, et en toute sécurité pour le patient,

et de permettre un télédiagnostic avec des résultats comparables à ceux que l'expert médical pourrait proposer s'il réalisait l'acte d'échographie auprès du patient.

MOTS-CLÉS : Télé-échographie robotisée, architecture bilatérale, variables d'onde, modèle interne, commande en raideur.

1. Introduction

La télé-échographie robotisée a été développée depuis le milieu des années 90 pour compenser le manque d'experts en échographie et leur regroupement dans les grands établissements de soins médicaux ; cela entraîne un nombre croissant de zones médicalement isolées et une difficulté d'accès aux soins de qualité pour une part grandissante de la population. L'échographie est une technique peu coûteuse, fiable et non invasive utilisée en routine dans les hôpitaux, mais il s'agit d'une technique expert-dépendante. Cela signifie que l'expert ne peut rendre un diagnostic que lorsqu'il est en mesure de combiner les connaissances anatomiques avec l'orientation de la sonde, la position de celle-ci sur le corps du patient et l'analyse des images échographiques. Arbeille (Arbeille, 2008) a montré que la télé-échographie robotisée offre une solution pour faire des diagnostics en temps réel pour les patients situés à distance avec des résultats comparables à des diagnostics réalisés par échographie locale. Cette approche robotisée est plus fiable que la modalité télé-échographie de base présentée dans les années 90 (Kontaxakis, 2000) (Chimiak, 1996). Plusieurs équipes de recherche (Fichtinger, 2008) (Masuda, 2011) (Vieyres, 2006) (Bassit, 2003) (Najafi, 2008) (Neubach, 2010) (Vilchis, 2003) (Ito, 2010) ont mis au point, avec diverses contraintes et objectifs (par exemple, l'insertion aiguille ou la biopsie de la prostate), des systèmes télé-opérés robotisés de télé-échographie portables via les réseaux de communication standards. Le lien de communication entre les sites introduit des retards variables qui génèrent des perturbations dans la stabilité du système robotisé et une détérioration du suivi de la trajectoire de consigne générée par l'expert médical. Pour préserver la stabilité et la transparence du système, nous avons développé deux architectures de commande bilatérale. Pour que le système soit transparent il faut que la sonde du robot reproduise les mouvements réalisés par l'expert médical manipulant une sonde haptique (de type joystick), mais aussi, que la force d'appui de la sonde, sur le

corps du patient distant, soit la même que celle générée par la sonde haptique manipulée par l'expert médical.

Cet article présente une nouvelle approche de commande pour compenser les perturbations des retards variables introduits par les liens de communication et pour fournir un retour de force anticipative sur le site expert ; cette commande est combinée avec une interface graphique interactive GUI (vieyres, 2012), non présentée ici, qui fournit à l'expert une connaissance précise des orientations de la sonde ultrasonore distance en contact avec le corps du patient. Ces approches combinées sont conçues pour améliorer les performances des robots de télé-échographie lors de la présence de retards intrinsèques aux liens de communication. L'article est organisé comme suit : les protocoles de réseau utilisables pour la télé-médecine sont discutés dans la partie 2, la partie 3 présente le concept la télé-échographie robotisée. Enfin, la partie 4 détaille la nouvelle architecture de pilotage développée pour anticiper la force de contact entre le robot et son environnement en présence de forts délais et les résultats de simulation.

2. Les caractéristiques de réseaux pour la télé-médecine

Les applications de télé-médecine peuvent être classées selon leur besoin en largeur de bande de transmission soit faible, moyenne ou grande. La gamme de choix de réseau pour la télé-médecine ces dernières années a inclu des technologies de communication filaire (lignes téléphoniques), RNIS et ADSL. Plus récemment, ces options se sont élargies sur des technologies numériques terrestres lignes ou cellulaires / sans fil, les réseaux à large bande à haut débit tels que les réseaux numériques (BISDN) avec un mode de transfert asynchrone (ATM), les réseaux satellitaires, réseau local sans fil (WLAN) et Bluetooth, permettant l'utilisation des systèmes de télé-médecine en mode ambulatoires et mobiles (Pattichis, 2002). Il convient de noter que pour les applications de télé-médecine et des technologies de télécommunications associées, il est important d'évaluer non seulement leurs capacités et le compromis coût/performance mais aussi le développement technique général (Reljin, 2001). En ce qui concerne la transmission des données médicales, il n'y a pas a priori de besoins spécifiques pour la bande passante. La portée et la complexité des exigences de la technologie de télécommunication varient en fonction de la spécificité et les caractéristiques de l'application de la

télémédecine donnée, généralement un manque de bande passante est interprété comme un temps de transmission plus long (Sachpazidis, 2006). Le tableau I résume les caractéristiques de bande passante nécessaire pour une transmission en temps réel pour quelques applications choisies de télémédecine. Dans tous les cas, la transmission utilisant des protocoles IP est fortement recommandée. Le protocole reste toujours le même, quels que soient les liens de communication utilisés. Les protocoles orientés connexion, comme le protocole TCP-IP, peuvent être utilisés pour la connexion de base (ex : données de contrôle pour assurer les connexions d'appareils), mais ne conviennent pas pour la transmission d'images ou de vidéos (Slama, 2008) (Xiaohui, 2003). Ce type de protocole réduit le taux de transmission du réseau lorsque la vitesse atteint la limite de l'un des maillons de la chaîne du réseau due à la répétition de la perte de paquets. Les protocoles sans connexion tels que le protocole UDP sont mieux adaptés pour la transmission d'images ou de vidéos et ne sont pas sensibles à ce dernier problème (Comer, 2000) (Postel, 1981). L'inconvénient est qu'il n'offre pas toutes les garanties que les informations seront délivrées à la destination finale. Pour des applications de télémédecine temps réel, le choix est simple : il vaut mieux perdre une seule image que de provoquer la surcharge ou de bloquer le lien de communication. Dans l'application de télé-échographie robotisée présentée ici, nous avons utilisé un protocole orienté connexion pour assurer la liaison entre les sites distants et le protocole de connexion pour transmission des données et des images. Quand une boucle de commande est requise à travers le réseau (par exemple pour contrôler à distance un robot), les données sont envoyées en utilisant le protocole UDP. Pour l'application de robotique médicale télé-opérée, pour éviter qu'une divergence mécanique du robot en cas de perte de données se produise et pour garantir la sécurité des patients, les données envoyées sont des points de consigne en position. En conséquence, en cas de perte de données, le robot reste orienté à la dernière position reçue. Des protocoles spécifiques sont conçus pour contrôler des robots à travers le réseau, mais ne sont pas normalisés (Wirz, 2009). Une fois le protocole bien défini pour une application de télémédecine donnée, les utilisateurs doivent faire face au temps de retard variable inhérent à la liaison de communication choisie et ses conséquences sur la stabilité et les propriétés de transparence du système télé-opéré. Les solutions pour maintenir la transparence et la propriété de stabilité au cours de l'acte de télé-échographie médicale sont présentées dans les sections suivantes.

Type de données	Bande passante minimale pour une transmission temps-réel
Pression artérielle numérisée	8 Kb/s
Thermomètre digital	8 Kb/s
Electrocardiogramme	16 Kb/s
Imagerie Ultrasonore	320 Kb/s
Dermatologie (haute résolution et couleur)	384 Kb/s
Radio Rayons X	384 Kb/s
Mammographie	384 Kb/s
Tomodensitométrie	384 Kb/s
Vidéo + audio conférence	320+64 Kb/s

Tableau 1. *Bande passante minimale requise pour quelques exemples en télé-médecine*

3. La plateforme de télé-échographie robotisée

Le système comprend trois parties reliées les unes aux autres : le site expert (l'opérateur), le site patient et la liaison de communication qui permet l'échange de données entre les deux stations (Figure 1).

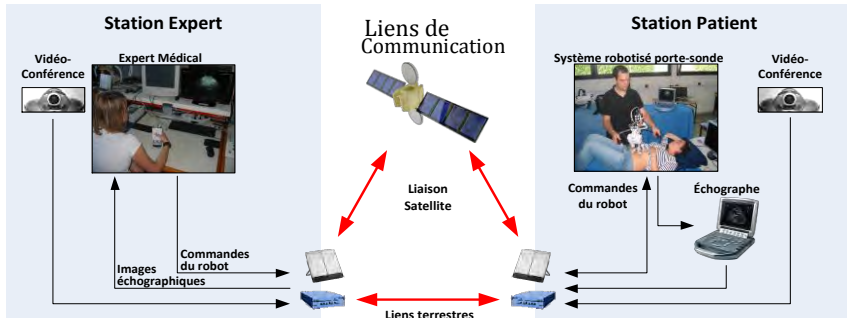


Figure 1. La chaîne de télé-échographie robotisée relie le site « expert » avec la sonde haptique et le site « patient » avec l'assistant via le lien de communication

Au site « expert » : le spécialiste utilise une sonde haptique pour contrôler l'effecteur du robot sur lequel est fixée la sonde ultrasonore. Le dispositif haptique permet à l'expert de ressentir les interactions (force) entre l'environnement distant (c'est à dire le corps du patient) et la sonde ultrasonore. Au site « patient » : le robot, portant la sonde ultrasonore, est positionné et maintenu sur le patient par un assistant. Le robot porte-sonde reproduit les gestes de l'expert médical au cours des procédures de télé-échographie grâce au dispositif de la sonde haptique. Le lien de communication : le réseau de communication relie les sites « expert » et « patient ». L'image échographique du patient est la seule information renvoyée, via le réseau, vers le spécialiste qui l'analyse en temps réel et propose un diagnostic. En fonction des besoins et de la disponibilité sur les sites concernés, un système de télé-opération peut utiliser différents types de liens de communication (par exemple WLAN, satellite). De plus, un système de visioconférence est utilisé pour des interactions visuelles et sonores entre l'expert, le patient et l'assistant et pour transférer les images ultrasonores du site « patient » vers le site « expert ».

Un robot de télé-échographie doit fournir au spécialiste les meilleures conditions de travail possible pour une consultation médicale à distance de qualité et tout en assurant la sécurité du patient. Cependant, l'utilisation des liens de communication entre les sites « expert » et « patient » présente des retards variables qui peuvent conduire à des perturbations dans la stabilité du système et la détérioration de la

poursuite de trajectoire de référence générée par l'expert. (Charron, 2011) a mesuré des délais de transmission sur un réseau de communications par satellite Inmarsat entre différents sites européens. La durée moyenne de ces retards de transmission est d'environ 1 seconde avec une variation moyenne de 200 ms. Ces longs délais variables impliquent le développement de l'architecture de contrôle spécifique pour maintenir la stabilité et la transparence du système télé-opéré. Le robot de télé-échographie reçoit aussi des perturbations externes qui peuvent affecter sa stabilité et sa transparence. Les deux perturbations majeures, prises en compte ici, sont le rythme respiratoire du patient et sa variabilité, de même que la compliance du corps du patient et sa variabilité. Pendant l'examen, le rythme respiratoire du patient peut varier en raison d'un état de stress. En outre, en variant le point de contact entre la sonde ultrasonore et le patient, la compliance peut être modifiée. Par conséquent, une architecture de contrôle spécifique doit intégrer ces perturbations afin de préserver la stabilité et la transparence du système.

4. Architecture de contrôle en raideur

Le système est dit transparent à deux conditions : l'extrémité de robot tenant la sonde réelle doit reproduire les mêmes orientations que celles générées par l'expert manipulant la sonde haptique (sonde fictive) et la force rendue par la sonde haptique dans la main de l'expert doit être la même que celle exercée par la sonde ultrasonore sur le corps du patient distant. L'architecture proposée est basée sur la théorie du contrôle par modèle interne (figure 2). Le site expert utilise un modèle du site patient (c'est-à-dire les systèmes robot et environnement) et la position de la sonde haptique pour obtenir une estimation du comportement du robot, référencé par rapport au temps côté expert. De plus, la raideur du corps du patient, avec lequel le robot est en contact, est mesurée ; elle est ensuite référencée, là encore, par rapport au "temps expert". La position et la raideur ainsi anticipées permettent la reconstruction de la force de retour.

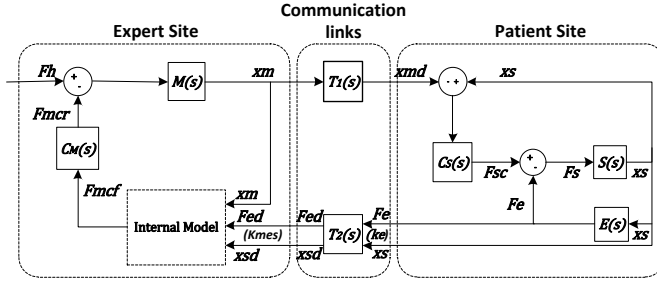


Figure 2. Architecture de contrôle en raideur.

La raideur mesurée $K_{mes}(t)$ du corps du patient, ressentie par l'expert et donnée par l'équation 1, présente une valeur moyenne K_{moy} . Une variation sinusoïdale est ajoutée pour représenter la fréquence de respiration du patient.

$$K_{mes}(t) = K_{moy} + Amp \cdot \sin(2\pi \frac{t}{T} + \Phi) \quad [1]$$

Ce modèle est une première approximation du phénomène réel qui est généralement plus complexe qu'une fonction sinusoïdale simple. Toutefois, il se justifie par la robustesse inhérente au modèle interne. En outre, pour K_{moy} , nous considérons une valeur de la raideur de l'abdomen chez l'homme, connue pour être relativement homogène, de l'ordre de 450 N/m $\pm$ 50 N/m (Tortora, 1990) (Sherwood, 2005). Ainsi, quatre paramètres permettent une identification complète de la raideur mesurée K_{mes} : K_{moy} , Amp , T et Φ , exprimant respectivement : la raideur moyenne, l'amplitude de la respiration, sa période et son déphasage. $K_{mes}(t)$ est reconstruite en temps réel et référencée au temps expert, fournissant une estimation de la raideur K_{est} . Les retards sont connus puisqu'évalués également en temps réel, cela évite ainsi une éventuelle instabilité. L'identification des quatre paramètres est réalisée en utilisant des méthodes de calculs simples afin de valider le concept. Cependant, pour affiner les résultats, l'algorithme de Levenberg-Marquardt a été utilisé (Marquardt, 1963). Cet algorithme de minimisation numérique fonctionne comme une procédure itérative pour minimiser un critère J (équation (2)). Dans ce cas, le critère J représente le carré de la différence entre la rigidité mesurée K_{mes} et la raideur estimée K_{est} .

$$J = \sum \{K_{mes}(t) - K_{est}(Amp, K_{moy}, T, \Phi, t)\}^2 \quad [2]$$

La force de retour F_{mcf} reçue par l'expert est calculée en utilisant la raideur estimée K_{est} et la position du robot déterminée par le modèle côté expert et ainsi référencée au temps expert (figure 3). Les résultats de simulation montrent la conservation de l'amplitude et de la fréquence de la position de référence x_m envoyée par l'expert et reproduit par le robot sur le corps du patient, où x_s représente un déplacement sinusoïdal de la sonde à ultrasons en contact avec le corps du patient (figure 4). Les signaux sont retardés d'un retard variable T_1 proche de 0,7 s. Considérant un patient présentant une respiration caractérisée par une période de 4,8s, une amplitude de 100 N/m, une phase de 0,52 rd avec un K_{moy} de 440 N/m, la figure 6 montre la force de retour anticipée F_{mcf} comparée à la force F_e générée par le robot sur le corps du patient.

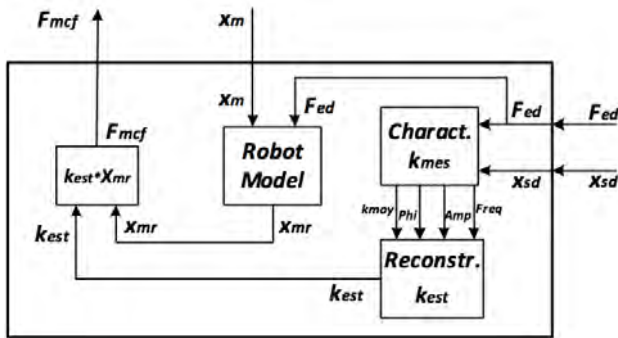


Figure 3. Détail du modèle interne proposé.

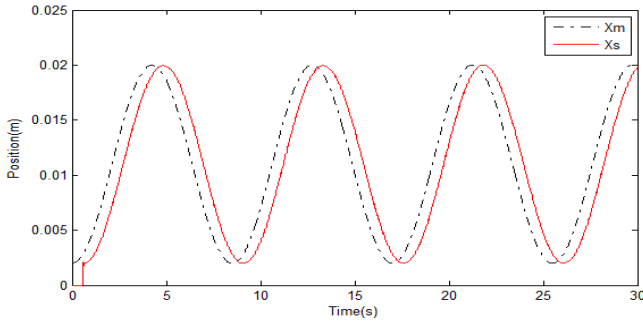


Figure 4. Comparaison entre la position d'entrée de référence x_m et le signal x_s reçu par le robot dans le cas de l'architecture de contrôle en raideur.

Ces résultats montrent que notre approche permet d'anticiper la force de contact entre le robot et son environnement et satisfait ainsi la notion de transparence, même s'il persiste de faibles erreurs d'amplitude (de l'ordre de 15%). La figure 6 propose une comparaison entre notre approche et une autre architecture : l'architecture de commande par variables d'onde (Charron, 2011). Nous constatons que les deux approches apportent une bonne transparence avec, cependant, une erreur d'amplitude plus réduite dans le cas de l'architecture en raideur.

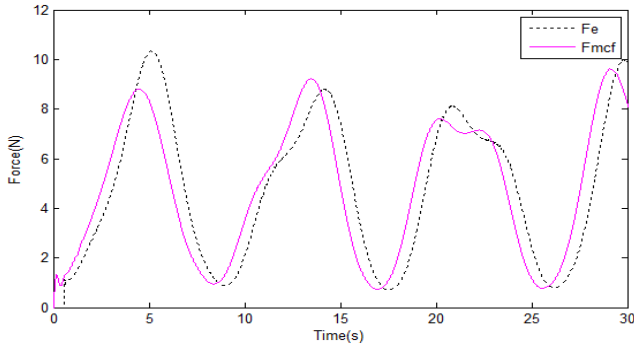


Figure 5 . Comparaison entre la force en entrée F_e générée par le robot et la force de retour F_{mcf} au site expert dans le cas de l'architecture de contrôle en raideur.

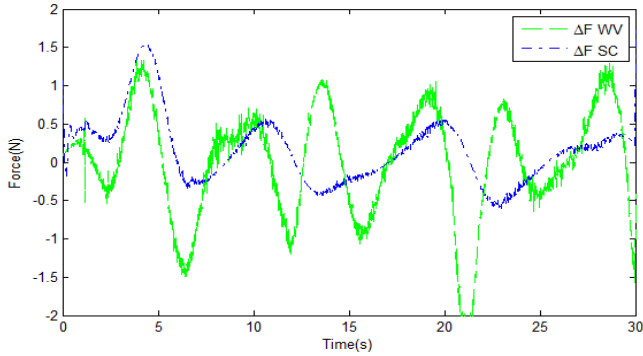


Figure 6. Comparaison entre les erreurs de la force de rétroaction *AFWV* (variables d'ondes-pointillé vert) et *AFSC* (commande de raideur - pointillé bleu)

5. Conclusion

Les résultats de simulation valident la qualité de la transparence offerte par notre architecture pour le système télé-opéré. En effet, elle permet de fournir à l'expert un retour de force égal à la force exercée par le robot. Autrement dit, elle permet de minimiser les effets négatifs des retards de transmission variables sur la transparence du système. En outre, elle permet d'intégrer des perturbations externes amenées par la fréquence variable de respiration du patient et la raideur du point de contact entre la sonde haptique et la peau du patient.

Bibliographie

- Arbeille P., Ayoub J., Kieffer V., Ruiz P., Combes B., Coatrieux A., Herve P., Garnier S., Leportz B., Lefebvre E., & Perrotin F., (2008). Realtime tele-operated abdominal and fetal echography in 4 medical centres, from one expert center, using a robotic arm & ISDN or satellite link . *IEEE Int. Conf. on Automation, Quality and Testing, Robotics, Cluj-Napoca*, 1, 45–46.
- Kontaxakis G., Walter S., Sakas G. (2000). EU-TeleInViVo: an integrated portable telemedicine workstation featuring acquisition, processing and transmission over low-bandwidth lines of 3D ultrasound volume images. *IEEE EMBS Int. Conf. on Information Technology Applications in Biomedicine*, 158–163.

- Chimiak W.J., Rainer R.O., Wolfman N.T., & Covitz W., (1996).Architecture for a high-performance tele-ultrasound system. In R. Gilbert Jost, Samuel J. Dwyer (Eds), *Proc. SPIE Medical Imaging 1996: Vol. 2711, PACS Design and Evaluation: Engineering and Clinical Issues* (pp. 459–465).
- Fichtinger G., Fiene J.P., Kennedy C.W., Kronreif G., Iordachita I., Song D.Y., Burdette E.C., & Kazanzides P. (2008). Robotic assistance for ultrasound-guided prostate brachytherapy. *Medical Image Analysis*, (12), 535-545.
- Masuda K., Kimura E., Tateishi N., & Ishihara K. (2011).Three dimensional motion mechanism of ultrasound probe and its application for tele-echography system. *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intel. Robots and Systems*, (2), 1112–1116.
- Vieyres P., Poisson G., Courrèges F., Novales C., Smith-Guerin N., Arbeille Ph., & Brù C. (2006) A tele-operated robotic system for mobile tele-echography : The OTELO project. In Springer publisher (Ed), *M-health, Emerging Mobile health Systems Book* , (461-474)
- Bassit L., Poisson G., & Vieyres P. (2003) Kinematics of a dedicated 6 DOF robot for tele-echography. *Int. Conf. on Advanced Robotics*, 906–910
- Najafi F., & Sepehri N. (2008) A novel hand-controller for remote ultrasound imaging. *Mechatronics* (18), 578–590.
- Neubach Z., & Shoham M. (2010) Ultrasound-Guided Robot for Flexible Needle Steering. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, (57), 799-805
- Vilchis A., Troccaz J., Cinquin P., et al. (2003). A new robot architecture for tele-echography. *IEEE Trans. Robot. Autom. Special issue on Medical Robotics*, (19), 922–926
- Ito K., Sugano S., & Iwata H. (2010) Portable and attachable tele-echography robot system: FASTele. *IEEE Int. Conf. on Engineering in Medicine and Biology Society*, 487-490.
- Vieyres P., Avgousti S , Chiccoli M , J. SandovalJ. , Novales C. *et al.* « A predictive control approach and interactive GUI to enhance distal environment rendering during robotized tele-echograph » *IEEE 12th Intern. Conf. on BioInformatics & BioEngineering (BIBE'12)* , Nov. 11-13, Larnaca, Cyprus, 2012
- Pattichis C., Kyriacou E., Voskarides S., Pattichis M., & Istepanian R. Schizas (2002) Wireless telemedicine systems: an overview. *IEEE Antennas and Propagat. Mag.*, (44), 143-153
- Reljin I.,(2001). Telecommunication Requirements in Telemedicine. *Annals of the Academy of Studenica, Novi Sad, Yugoslavia*, (4), 53-62.
- Sachpazidis I., Ohl R., Kontaxakis G., & Sakas M. (2006) TeleHealth networks: Instant messaging and point-to-point communication over the internet. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 569(2), 631-634.
- Slama T., Trevisani A., Aubry D., Oboe R., & Kratz F. (2008). Experimental analysis of an internet-based bilateral teleoperation system with motion and force scaling using a model predictive controller. *IEEE trans. On Industrial Electronics*, (55), 3290-3299

- Xiaohui X., Zhijiang D., & Lining S., (2003). The design and implementation of real-time Internet-based telerobotics. *IEEE Int. Conf. on Robotics, Intelligent Systems and Signal Process.*, (2), 815-819.
- Comer, D.E. (2000), Internetworking with TCP/IP Volume 1: Principles, Protocols, and Architecture, *Prentice Hall* 187-227
- Postel, J. (1981), RFC 793: Transmission control protocol, *DARPA Internet Program Protocol Specification*.
- Wirz R., Marin R., Ferre M., Barrio J., Claver J.M., & Ortego J., (2009). Bidirectional transport protocol for teleoperated robots. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, (56), 3772-3781
- Charron G., (2011). Contribution à la commande bilatérale et à la gestion des configuration singulières pour le suivi de trajectoire d'un système télé-opéré: application à la télé-échographie robotisée par satellite, PhD, Univ. Orleans, France.
- Niemeyer G., & Slotine J.J.,(1997). Designing force reflecting teleoperators with large time delays to appear as virtual tools. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (3), 2212–2218.
- Tortora G. J., & Anagnostakos N. P., (1990). *Principles of Anatomy and Physiology*. 6th Edition, New York Harper-Collins
- Sherwood L., (2005). *Fundamentals of Physiology : A Human Perspective*, Thomson Brooks/Cole.
- Marquardt D.,(1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, (11), 431-441.

Mini CV et photo de tous les auteurs



Juan Sebastián Sandoval est Ingénieur Mécatronique de l'Université Nationale de Colombie. De plus, il a reçu son diplôme de Master en Electronique, Signal et Microsystèmes à l'École Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire (ENIVL) en 2012. Il a travaillé au sein du Laboratoire PRISME, dans l'équipe robotique, et son sujet de recherche a été principalement le développement des architectures de commande bilatérale pour la télé-échographie robotisée.



Laurence Josserand est maître de conférences à l'Université d'Orléans depuis 1999 au laboratoire Prisme. Ses recherches portent sur le contrôle des systèmes, tout d'abord pour des systèmes décrits par des équations aux dérivées partielles et désormais en robotique médicale, notamment le problème de l'estimation et de la prédiction du mouvement respiratoire pour la télé-échographie robotisée.



Cyril Novales est diplômé de l'Institut Supérieur des Ingénieurs de Montpellier en Micro-Electronique et Automatique en 1989. Il a soutenu en 1994 une thèse financée par le CNRS au LIRMM de Montpellier sur la robotique mobile. Il a effectué 2 années de post-doctorat à l'INRIA Rhône-Alpes à Grenoble sur les véhicules automatiques. Depuis 1997, il occupe un poste de Maître de Conférences à l'Université d'Orléans/IUT de Bourges, et au sein du laboratoire PRISME. Ses travaux de recherche portent sur les robots télé-échographiques (aspects conception, commande et transmission), et sur robots mobiles laboratoire (aspects architecture, navigation et perception).



Aïcha Fonte Guerrouad est Maître de Conférences à l'école Polytechnique de l'université d'Orléans. Elle a obtenu son diplôme de Doctorat en Automatique et Traitement du Signal à l'Université de Lille 1 en 1990. Elle a rejoint le laboratoire PRISME de l'Université d'Orléans en 2002 et travaille au sein du groupe Robotique. Elle s'intéresse au développement des applications médicales de la robotique. Ses activités concernent principalement les différentes architectures de commande bilatérales pour la télé-opération en présence de retard variable et les systèmes haptiques.



Pierre Vieyres est professeur des Universités en poste à l'IUT de Bourges. Il a reçu son diplôme de Doctorat en Ingénierie Biomédicale à l'Université de Tours en 1990. Après un post doctorat à l'Université de Drexel (USA), il rejoint le laboratoire PRISME de l'Université d'Orléans en 1992. Depuis 1995, il travaille au sein du groupe Robotique et s'intéresse au développement des applications médicales de la robotique. Il a été le coordinateur du projet Européen OTELO (IST-2001) en ANR-PROSIT 2008 au cours duquel ont été développés des robots légers pour la télé-échographie à distance. Ses activités s'intéressent aux architectures bilatérales pour la télé-opération et les systèmes haptiques.

Systèmes Complexes et Plan Global de Secours : vers un plan global Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement

Mehdi Tahan*^{oo}, Jean Vareille*^o, Laurent Nana*, Olivier Danjean^{oo}, Lt-Colonel Hervé Mahoudo, Gilles Cloarec****

- * *Lab-STICC, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance (UMR CNRS 6285)
Université de Brest, UEB, 20 avenue Le Gorgeu, BP 817 - CS 93837
29238 BREST Cedex 3*
- ** *SDIS 29, Service Départemental d'Incendie et de Secours du Finistère
Ex-Direction Expertise, Recherche et Développement
17 rue Amiral Romain Desfossés, 29200 BREST*
- ^o *IUT de Brest, département GMP, rue de Kergoat, 29238 BREST Cedex 3*
- ^{oo} *Inovadys, 65 Place Nicolas Copernic, 29280 PLOUZANE*

mehdi.tahan@univ-brest.fr, jean.vareille@univ-brest.fr, laurent.nana@univ-brest.fr ; olivier.danjean@inovadys.com ; herve.mahoudo@sdis29.fr, gilles.cloarec@sdis29.fr ;

**Sections de rattachement : 27,
Secteurs : Secondaire / Tertiaire**

RÉSUMÉ. La gestion de crise exige une prise de décision précise et adaptée, dont les conséquences peuvent avoir un impact considérable. Les nombreux éléments mis en jeu rendent complexe l'évaluation de la situation et la prise de décision. La communication entre acteurs pluridisciplinaires, la prise en compte de l'environnement ou la multiplicité des risques sont autant d'éléments à intégrer. On est confronté aux problématiques des systèmes complexes, dont la compréhension, l'analyse et la prévision du comportement passent par l'utilisation de modèles de natures différentes. La demande d'outils répondant

à ces contraintes est croissante, c'est pourquoi nous avons mené des travaux pour y répondre. Nous présentons dans cet article l'approche que nous avons proposée. Une extension de nos solutions au domaine QHSE est proposée ainsi que leur intégration dans les enseignements de spécialités de DUT.

MOTS-CLÉS : Plan Global de Secours, OpenData, Document Unique, Développement en X, Territoires.

Introduction

En 1976, à Meda (Italie), s'est produite une catastrophe industrielle lors du rejet d'un nuage toxique dans l'atmosphère : 500 000 doses mortelles pour l'homme ont été rejetées dans la nature et 2000 hectares ont été contaminés. L'une des communes touchées a donné son nom à la directive européenne 96/82/CE, dite directive Seveso II (Directive 96/82/CE 1996). En 2001, la catastrophe de l'usine chimique AZF a tué 31 personnes, en a blessé 2500 et en a choqué plus de 14000 alors que les effectifs de l'usine s'élevaient à 470 employés. L'usine, construite à l'origine en périphérie de la ville, a été progressivement entourée par l'agglomération. La loi n°2003-699, promulguée 2 ans après et destinée aux activités à risques, s'est articulée autour de deux thématiques principales : la prévention des risques technologiques (intégrant la prise en compte de l'urbanisme) et la prévention des risques naturels.

Ces catastrophes ont fait prendre conscience du besoin d'une politique de sécurité systémique (prenant aussi bien en compte l'environnement que l'installation).

Les principes de prévention et de précaution à l'égard de l'environnement sont, depuis 2005, devenus des devoirs pour tous les citoyens français (LOI constitutionnelle n° 2005-205 2005). Ajoutée à la constitution française, la charte de l'environnement le stipule dans les articles 2 et 3, tandis que les articles 8 et 9 enjoignent l'éducation, la formation, la recherche et l'innovation à contribuer aujourd'hui et demain à l'élaboration d'un meilleur environnement.

La résolution de crise demande l'intervention de plusieurs acteurs, internes et externes au site concerné. L'intervenant va coordonner des actions en vue d'obtenir une situation sous contrôle, puis un retour « à la normale ». Son intervention doit être réalisée dans un espace-temps

borné, où chaque instant doit être utilisé de manière optimale. Afin de prendre des décisions adéquates dans un temps imparti, il doit disposer de tous les éléments nécessaires à sa réflexion. Connaître le site industriel avant intervention est l'élément de base de cette démarche. Toutefois connaître le site ne suffit pas car un incident peut déborder sur son environnement. Il est donc important de disposer d'informations extérieures au site et de raisonner en termes de territoire. L'intervenant n'opère pas seul : les sapeurs-pompiers, les forces de l'ordre et l'industriel pouvant travailler conjointement par exemple. Il est donc nécessaire de pouvoir échanger entre les parties les connaissances au sujet du site, de son environnement et sur les actions entreprises. Cette base de connaissances doit être formalisée et normalisée dans l'optique d'une exploitation adaptée. Des outils d'ajout de connaissances doivent être également disponibles.

Une catastrophe comme Fukushima nous rappelle combien ces problématiques sont d'actualité. Force est de constater que nous ne disposons pas aujourd'hui d'outils permettant de faire face à un tel événement. Il est par conséquent nécessaire d'y consacrer un effort de recherche. La réponse à ces problématiques passe par des modifications réglementaires, la formation des personnes, l'élaboration et la mise en œuvre de méthodes et d'outils nouveaux pour la sécurité.

Dans cet article, nous présentons les éléments de réflexion et les résultats issus de nos travaux visant à répondre aux problèmes susmentionnés, notamment par la proposition d'une plate-forme intégrant les concepts, mécanismes et outils nécessaires à la gestion de situations de crise et la planification d'urgence dans un contexte de sécurité.

Dans la deuxième section, nous présentons les approches et moyens couramment utilisés pour la gestion de situations de crises dans le domaine de la sécurité et mettons en exergue leurs limitations. Dans la troisième section, nous présentons la plateforme SécuRéVi proposée pour la sécurité. La section 4 est consacrée au Plan Global de Secours (PGS), partie méthodologique majeure de la plate-forme SécuRéVi. Dans la section 5, nous présentons le support logiciel mis en œuvre pour la plate-forme SécuRéVi. La section 6 est consacrée aux apports de l'OpenData pour une meilleure réponse à la problématique importante de gestion de l'information dans les applications de sécurité et de planification d'urgence. Dans la section 7, nous abordons l'extension de notre approche

au domaine qualité, hygiène, sécurité, environnement et santé au travail. Cette extension concerne plus particulièrement la prise en compte de l'environnement dans l'ensemble des processus de gestion de crise, grâce à l'intégration de la méthode en X. Nous terminons cet article par une discussion sur l'intégration de notre approche dans les enseignements de différentes spécialités de DUT.

Approches et solutions courantes pour la sécurité

Pour les sites potentiellement dangereux, différentes démarches cohabitent pour la prévention et la planification dans le domaine de la sécurité dont le DUER (Document Unique d'Évaluation des Risques) ou le PPI (Plan Particulier d'Intervention). Ces démarches visent à inventorier les risques et à mieux s'y préparer. Les principes de rédaction de ces documents sont basés sur la compréhension de l'environnement (professionnel, écologique, social...). Des experts sécurité (SDIS, CHSCT...) sont chargés d'analyser la situation et de proposer des solutions aux différents problèmes repérés. Des actions sont entreprises pour garantir un niveau de sécurité maximal.

Les différents documents rédigés sont utilisés à des fins de formation, mais aussi d'aide à la décision en cas de crise.

Régulièrement des exercices sont réalisés pour tester l'efficacité des procédures tout en assurant la formation des intervenants. Des scénarios sont élaborés et testés in-situ. Des opérations de grande ampleur peuvent demander l'intervention de plusieurs corps de métiers. L'exercice permet de vérifier les capacités de communication inter-profession. Ces manœuvres peuvent être rapidement complexes à mettre en œuvre.

Depuis quelques années, de nouveaux systèmes d'apprentissage sont testés, en particulier le serious gaming et la réalité virtuelle. Les nouvelles technologies offrent la possibilité de simuler, avec plus de facilité, des interventions variées. Leur principe est de plonger l'apprenant dans une représentation de l'environnement réel et de le faire interagir avec les différents éléments. Cette approche ne propose que l'utilisation d'environnements limités, car il est actuellement impossible de simuler la totalité de l'environnement réel.

L'étude des différents éléments actuels révèle un certain cloisonnement dans la production de données, leur orientation métier, leur utilisation, voire leur localisation. À cela s'ajoute un manque d'outils collaboratifs aptes à travailler de manière globale acceptant l'intégration plurielle de risque, de site et de discipline.

À partir de ce constat, une plate-forme intégrant les concepts jugés fondamentaux pour la sécurité a été proposée. Nous la présentons ci-après.

La plate-forme SécuRéVi

La plate-forme SécuRéVi (Mahoudo 2012) est une plate-forme de compréhension et de communication destinée aussi bien à passer qu'à appréhender une commande (Figure 1). Elle permet à différents acteurs, d'horizons divers, d'échanger et de communiquer autour d'une situation de crise. Elle s'appuie sur une base de connaissances préalables (PGS) intégrée dans un Système d'Information Géographique (SIG) ainsi que sur des sources de données externes variées (outils de mesure, appareil photo, outils informatiques orientés métiers...).

L'ensemble interagit avec un système de suivi et de prévision d'événements (sinistre, incident...) avec engagement de moyens (personnels et matériels) dans lequel chaque objet, événement ou personnel peut indexer des données (ex : fiche descriptive, procédure, mode d'emploi...).

SécuRéVi permet une approche à la fois dans l'espace et dans le temps. Elle offre un suivi temps réel qui permet de faire des rejeux qui alimenteront la base retex (retour d'expérience) associée. Enfin, dans la plate-forme, un monde 2D peut être associé à un monde 3D permettant un passage du réel au virtuel et inversement.

Son exploitation se fait via un ordinateur standard pouvant être enrichi d'autres outils (vidéo projecteur, tableau blanc interactif, etc.).

Son utilisation a lieu lors d'interventions, pendant lesquelles les informations in-situ et le PGS permettent une meilleure compréhension du contexte. Toute intervention se conclut par un retour d'expérience qui permet d'enrichir la base de connaissances pour des opérations futures. La

formation va quant à elle tirer parti de la plate-forme en permettant l'utilisation d'informations, non plus réelles, mais virtuelles tout en conservant un cadre de fonctionnement réaliste.



Figure 1. Plate-forme SécureVi (Management de la sécurité)

Les concepts et méthodologies initiaux développés pour réaliser la plate-forme SécureVi ont été établis, dans le cadre du service Prévision puis de la Direction Expertise Recherche et Développement (DERD) du Service Départemental d'Incendie et de Secours du Finistère (SDIS29),

par le Colonel Hervé MAHOUDO et l'ingénieur Gilles CLOAREC du SDIS29, et l'ingénieur Olivier DANJEAN, dirigeant de la société INOVADYS.

Cette plate-forme est utilisée par le Colonel Hervé MAHOUDO et Gilles CLOAREC dans le cadre d'enseignements dispensés à l'École Nationale des Officiers Sapeurs Pompiers (ENSOSP, ministère de l'intérieur), dans les domaines suivants :

- Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE),
- Risques chimiques (stages RCH4),
- Planification d'urgence (Mahoudo et al., 2011),
- Gestion de crise.

La plate-forme et les concepts qu'elle intègre font également l'objet d'enseignements dispensés par le Colonel Hervé MAHOUDO et Gilles CLOAREC, à l'occasion de vacations à l'Université de Bretagne Occidentale (UBO), à l'Université de Bretagne Sud (UBS), à l'Université de Bordeaux (dans le domaine QHSE) et à l'Université de Rennes 2 (dans le cadre des masters SIG).

Sa mise en œuvre sur site consiste à réaliser le PGS de l'établissement, à mettre en place les outils de gestion, de suivi et de prévision de situations ainsi qu'à déployer les interfaces matérielles.

L'ensemble constitue une base de connaissance numérique multi-services et pluridisciplinaire pour l'exploitation quotidienne, la formation, l'intervention et la communication. Il est exploitable par le commandant des opérations de secours, le directeur des opérations internes, le responsable sécurité du site, les formateurs et toutes les autres personnes internes habilitées par l'entreprise.

Dans la section suivante nous présentons le PGS qui joue un rôle de première importance dans la gestion de situations de crises.

Le PGS

Plus une situation de crise est de grande ampleur, plus la quantité d'informations échangées est considérable. La prise de décision s'effectue à partir des observations du sinistre et des actions sont exécutées en conséquence. La complexité explose avec le nombre de disciplines engagées pour la résolution de la crise.

Les problématiques pour le commandement sont de récupérer ces flux d'informations, de les agréger malgré leur hétérogénéité (dans leur fond comme dans leur forme) et d'assurer leur compréhension par les différents acteurs.

Le PGS offre une approche par site, multi-risques, multi-acteurs et pluridisciplinaire compatible avec cette complexité de travail. Par sa conception le PGS permet son adaptation au contexte d'exploitation par l'utilisation de différentes trames ouvertes (Figure 2). Il garantit la gestion des données et des informations ainsi que leur valorisation dans le temps. Sa flexibilité autorise une utilisation aussi bien lors d'un sinistre qu'en formation, chaque mise en œuvre augmentant la base de connaissances.

D'un point de vue technique, dans un système, l'accident peut être provoqué par un dysfonctionnement interne ou par l'intervention inopinée d'un élément externe. La défaillance interne est un risque conventionnel, comme la rupture d'une pièce, que les méthodologies actuelles prennent en compte, en la remplaçant préventivement par exemple. L'environnement étant ouvert, par définition, l'entrée d'un élément perturbateur dans la zone à risque est possible. La situation est susceptible d'évoluer dans le temps. La plate-forme SécuRéVi, intégrant le PGS, propose une approche dynamique du suivi et, donc, de la gestion de crise : les informations relatives à la situation réelle sont intégrées à la base de connaissances afin de permettre aux experts de prendre les décisions opportunes et d'en prévoir les conséquences.

- Présentation de l'établissement
- Visualisation de l'établissement
- Réglementation
- Etude de dangers
- Planification d'urgence
 - Plan d'Opération Interne (P.O.I.)
 - Plan d'Etablissement Répertoire (P.E.R.)
 - Plan ORSEC départemental (ORSEC)
 - Plan Particulier d'Intervention (P.P.I.)
 - Plan Intercommunal de Sauvegarde (P.I.C.S.)
 - Plans pour PC et Situation tactique
- Produits dangereux
- Scénarios de sinistres retenus
- Moyen de secours
 - Moyens internes
 - Moyens externes
- Simulation de sinistres
- Formation, exercice et manœuvres
- Retours d'expérience

Figure 2. *Exemple de menu PGS d'un site SEVESO*

Après cette présentation du PGS, nous abordons ci-après l'environnement logiciel développé pour la mise en œuvre des concepts de la plate-forme SécuRéVi.

La plate-forme logicielle associée à SécuRéVi

Le colonel Hervé MAHOUDO, l'ingénieur Gilles CLOAREC, dans le cadre de leurs différents travaux et enseignements, et la société Inovadys basée au Technopole Brest-Iroise ont initié le développement d'une plate-forme logicielle de gestion documentaire, permettant la mise en œuvre du PGS.

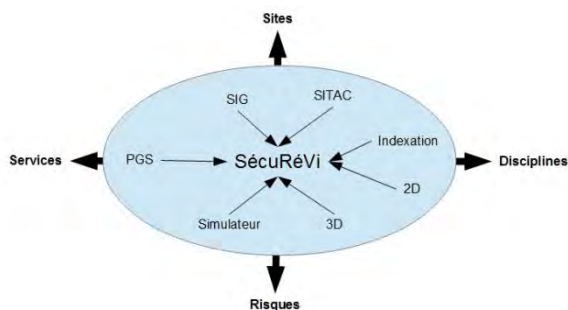


Figure 3. *Intégration et diffusion autour du pôle SécuRéVi*

Elle permet de rassembler les différents composants de la prévention et de la planification d'urgence et est destinée aussi bien aux sapeurs pompiers qu'à des acteurs d'horizons divers tant du secteur privé que du secteur public (industriel, scientifique, juridique...). Elle s'adapte au contexte des outils disponibles et au contexte organisationnel en gérant les flux entrant et sortant (Figure 3). Les domaines d'application de l'outil vont de l'exploitation pétrolière à la grande distribution, en passant par la gestion de communes.



Figure 4. *SITAC - Vue Carte*

Tout PGS est attaché à un territoire. En cas de crise, ce territoire permet de contextualiser l'incident. La plate-forme logicielle permet de se

déplacer sur ce territoire à différents niveaux de granularité. Il est possible d'y consulter les données répertoriées. De plus, SécuRéVi offre la possibilité de renseigner les différentes informations permettant de visualiser le nouveau super-système et d'élaborer la stratégie de gestion de crise, grâce aux outils fournis. Ainsi, à partir d'une vue cartographique (Figure 4), on va pouvoir disposer les moyens et renseigner des informations associées. Dans une optique métier, les codes établis sont respectés par l'utilisation de chartes graphiques telles que celles établies par l'ENSOSP par exemple.



Figure 5. *SITAC - Vue sphérique*

Il est possible de se déplacer au niveau du sol grâce à des visualisations sphériques (Figure 5). Les outils de renseignement restent les mêmes et permettent une exploitation homogène.

La conception du logiciel a été conditionnée en grande partie par les spécificités de l'environnement d'exploitation. Notre objectif est de développer cette approche et de prendre en compte tout environnement permettant de proposer un outil toujours plus performant. Pour cela, il est souhaitable de définir au mieux les environnements humains et métiers, mais aussi informatifs ou technologiques, ou tout environnement susceptible d'augmenter les performances de la plate-forme.

Dans le cadre de nos travaux, l'OpenData nous a semblé offrir un support intéressant pour la gestion des informations. Nous présentons ci après les résultats de notre réflexion sur l'OpenData et la gestion des informations.

OpenData et gestion des informations

La gestion des informations étant un problème récurrent dans la planification d'urgence, l'un de nos objectifs est d'étudier et d'apporter des solutions permettant une meilleure prise en compte de la diversité des formats de représentation de données. Dans cette perspective, nous envisageons d'améliorer les outils de gestion de crise existants pour augmenter leur capacité à accepter de nouveaux formats de documents jugés utiles (produits en interne comme en externe), d'origines diverses, à les traiter et à les redistribuer en adéquation avec les exigences métiers.

L'OpenData est « une mouvance technologique de partage qui tend à rendre accessibles et compréhensibles des données privées rendues publiques de la manière la plus simple possible ». Son développement a été initié par des gouvernements (en particulier anglo-saxons) qui ont mis à disposition du public des données numériques étatiques. Certaines sociétés leur ont ensuite emboîté le pas et ont délivré des informations exploitables par des tiers, dans le but de proposer des services supplémentaires à moindres frais.

La principale limite de l'OpenData réside dans l'intégration des données disponibles. Les formats de données généralement utilisés ne sont pas standardisés (et sont en majorité propriétaires) de même que leur organisation : une information identique produite par deux instances distinctes n'aura pas la même représentation. Des outils sont donc nécessaires pour leur intégration.

Des outils comme Google Refine ® prennent en charge les formats les plus courants utilisés dans le domaine OpenData (tableau et document texte), permettent de nettoyer les données en entrée et offrent des facilités de production de nouvelles données à partir de ces entrées. Dans le domaine de la sécurité, les formats d'entrée sont plus vastes (l'image, la vidéo et la 3D faisant partie des types de données susceptibles d'être exploitées). Les informations disponibles sont en général difficilement

interprétables par un ordinateur et leur organisation est variable d'un site à l'autre. L'intégration d'experts du domaine est obligatoire. L'outil de production doit proposer la mise en relation la plus performante possible entre l'expert et la donnée, ainsi que des fonctionnalités d'automatisation de tâche.

Notre approche permet l'intégration des méthodes de travail des experts en vue de fournir des outils adaptés. L'étude du domaine de l'OpenData nous a permis de découvrir des méthodes de travail ainsi que les outils associés. Toutefois les limites inhérentes à leur domaine, nous empêchent de les intégrer pleinement dans nos travaux.

Après cette présentation de l'OpenData, nous abordons ci-après l'extension de la plate-forme SécuRéVi dans la perspective d'une évolution vers la prise en compte de la QHSE. Il s'agit plus précisément de la prise en compte de l'environnement dans l'ensemble du processus de gestion de situations de crise, grâce à l'intégration de la méthode de développement en X. Nous montrons les apports de cette méthodologie dans le cadre de la résolution de crises. Le souhait, à terme, est d'intégrer également les autres dimensions de la QHSE.

Vers une prise en compte de la QHSE : intégration de la méthode de développement en X

La méthode de développement en X (voir Figure 6) est une méthode de conception récente, élaborée au sein du Lab-STICC (Tahan 2011). Elle propose une prise en compte de l'environnement physique, chimique, biologique mais aussi informationnel dans lequel évolue un système, depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie, en passant par son utilisation. Les préoccupations de la méthode de développement en X et du PGS sont très proches. L'exploitation de leur complémentarité permettrait de les améliorer mutuellement.

Nous proposons une première sous-partie débutant par une explication de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) du système dans le développement en X, suivie d'une proposition de couplage simplifiée avec le PGS. La résolution de crise à travers le PGS et le développement en X seront au cœur de la seconde sous-partie.

ACV Système

La méthode de développement en X est issue d'une réflexion sur la globalisation des points de vue de différents acteurs réunis autour d'un système, le tout en considérant l'environnement.

On peut y retrouver des méthodes provenant de domaines métiers variés, comme la méthode en cascade ou le cycle en V. Ces méthodes sont généralement dédiées à la conception. Dans un but ACV, nous avons ajouté une composante « utilisation » du système, issue de cette conception. Durant sa conception mais aussi son utilisation, le système s'intègre dans un environnement préexistant. Par ses caractéristiques propres, cet environnement conditionne une grande partie du système. Il est donc essentiel de le retrouver dans notre méthodologie.

Nous l'avons scindé en deux, en une partie matérielle (physique, chimique et biologique) et une partie immatérielle regroupant les connaissances, les données, les informations, les logiciels ...

Le système, objet de l'étude, est immergé dans son environnement. Nous appelons super-système l'ensemble formé du système et des milieux extérieurs avec lesquels il peut échanger. Les limites du super-système sont floues, le rendant de fait évolutif et perméable. Le super-système n'est à priori ni fermé ni en équilibre.

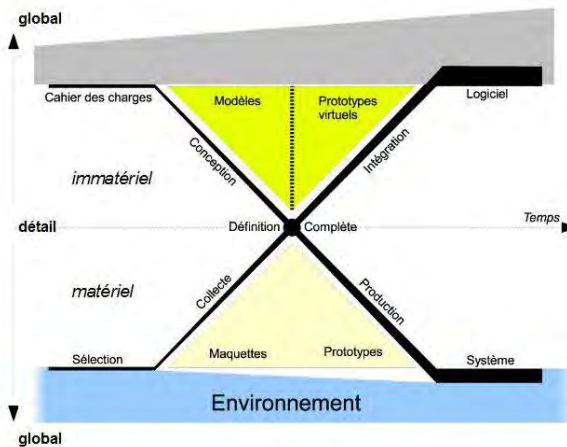


Figure 6. Le développement en X

Dans le cas d'un incident, le super-système est modifié soit parce que le système diverge de son fonctionnement nominal, soit parce qu'il est victime de l'irruption d'éléments extérieurs. C'est pourquoi il est important dans le domaine de la sécurité de se préparer à ce type d'éventualité.

Dans la planification d'urgence, les acteurs concernés préparent des moyens pour un territoire donné. Ces trois éléments, acteur, moyen et territoire, s'inscrivent dans l'environnement matériel du développement en X. Il est important de pouvoir les identifier dès le début de la conception d'un système « sécurité ». Cela correspond à la branche inférieure gauche du développement en X. Dans le PGS, on va retrouver une compilation des informations relatives à ces éléments, augmentée de toutes les informations susceptibles d'aider à la résolution de crise.

Le PGS se situe dans la partie supérieure droite du X, dans l'environnement immatériel. Il est l'un des résultats de la conception d'un écosystème orienté sécurité. Son exploitation se fait à travers l'utilisation de la plate-forme SécuRéVi. Cette plate-forme s'appuie sur une partie hardware (ordinateur personnel, appareil photo, Smartboard...) et d'une partie immatérielle constituée de logiciels et de données. Cet ensemble permet de disposer d'un environnement adéquat à la résolution de crise.

Résolution de crise

L'origine d'un incident est toujours un événement imprévu qui perturbe le super-système. C'est à partir de ce moment que l'intervention des secours débute. Ces secours doivent concevoir une réponse adaptée à un super-système nouvellement créé, hérité d'un super-système devenu obsolète.

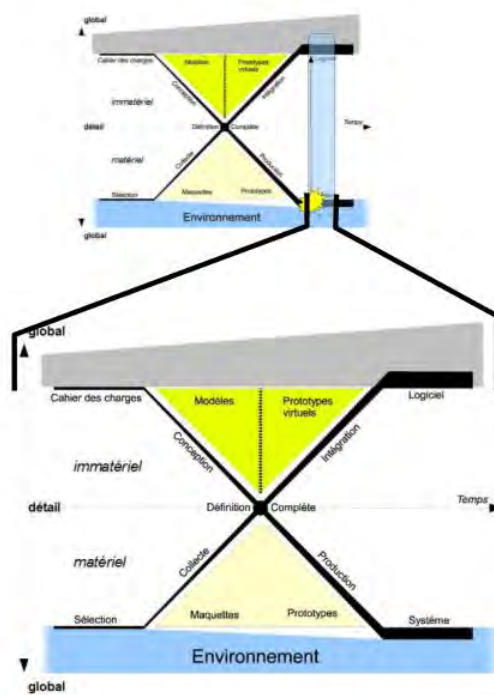


Figure 7. Gestion de crise dans le développement en X

La compréhension de ce nouveau super-système est une priorité. De cette compréhension résulte une bonne organisation des moyens mis en œuvre par les différents acteurs. Le PGS permet de réduire le temps dévolu à cette tâche, la préparation des informations étant faite en amont. La méthode de développement en X permet quant à elle de visualiser la totalité de la conception de la solution, de son démarrage à l'obtention d'une situation sous contrôle puis d'un retour « à la normale » (voir Figure 7).

Dans la section suivante, nous discutons de l'application des travaux effectués dans le cadre des enseignements en DUT.

Application en DUT

La possibilité, dès le début de la conception d'un système, de capitaliser les informations en vue d'une exploitation dans les domaines qualité, hygiène, sécurité et environnement (QHSE) doit être offerte (Tahan et al., 2012).

Plusieurs spécialités de DUT, en particulier dans la filière « Hygiène, Sécurité et Environnement » (Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche 2010), proposent de traiter la sécurité de manière partielle ou assez complète. Nous proposons des solutions et outils génériques pour fédérer la démarche de sécurité, de la phase de conception à la phase d'exploitation. La méthodologie de développement en X permet d'étendre les possibilités à une prise en compte de l'environnement dans l'ensemble de ce processus. Les solutions et outils proposés pourront servir dans le cadre de ces formations.

Dans le programme pédagogique national du DUT HSE, publié le 1er juillet 2010, figurent de nombreux modules dont les programmes ont rapport avec le PGS et SécuRéVi.

Par exemple les modules

- M1.1.1 Introduction à l'évaluation et à la maîtrise des risques : concepts et vocabulaire
- M1.1.2 Santé/sécurité au travail et Introduction au document unique
- M1.1.3 Environnement, gestion des risques et protection
- M3.4.1-1 Aspects pratiques de la mise en sécurité des installations : risques et accidents industriels.

Les trois modules du thème T4.1, Aspects organisationnels, réglementaires et techniques du risque environnemental, etc.

La gestion des risques en atelier est également évoquée en DUT GMP, abordée dans le cas des DUT GEIL, en GB, GC, etc.

Dans le futur nous assisterons progressivement à la mise en place de systèmes interopérables dédiés aux risques et à la gestion des secours. Ces systèmes emploieront les technologies de la connaissance et de la communication, afin de capitaliser les données et les diffuser. Ils seront utilisés également pour le suivi et la gestion des accidents du travail et, plus généralement, les aspects hygiène et environnemental.

Les échecs concomitants à une gestion inappropriée des secours lors de catastrophes récentes montrent que les recherches dans ce domaine sont nécessaires.

Conclusion

De par la complexité de la résolution de crise, il est important de disposer d'outils adaptés novateurs.

Nous avons présenté dans cet article les solutions que nous proposons pour la prévention des risques et la résolution de situations de crise. Elles s'articulent autour d'une plate-forme ouverte nommée SécuRéVi, intégrant différentes approches méthodologiques dont le Plan Global de Secours, une base de connaissances évolutive permettant de capitaliser les retours d'expérience de situations antérieures, des modèles pour la formation, des moyens de communication adaptés entre acteurs. L'intégration dans cette plate-forme, de la méthode de développement en X permet de prendre en compte l'environnement dans la prévention et la gestion du risque. Une plate-forme logicielle mettant en œuvre les concepts de SécuRéVi a été développée.

Le PGS permet une gestion globale des connaissances à la différence des approches actuelles. Les outils classiques fractionnent (par métiers habituellement) des éléments importants pour la bonne compréhension d'une situation, rendant complexe son appréhension.

Par l'utilisation des outils informatiques et des nouvelles technologies, SécuRéVi permet une manipulation aisée des informations. Son architecture ouverte garantit une bonne plasticité d'adaptation au contexte d'utilisation, ainsi qu'une évolutivité à d'autres domaines.

La méthode de développement en X offre un cadre de conception basée sur la prise en compte de l'environnement, aussi bien matériel

qu'immatériel. La réflexion ne se fait plus uniquement sur le système cible mais sur le super-système (système et environnement proche). Son utilisation peut se faire dans le cadre de résolution de crise mais aussi celui de la conception de la plate-forme SécuRéVi.

L'approche proposée a été validée dans le domaine de la sécurité par son utilisation industrielle quotidienne. En effet, plusieurs établissements ont adopté cette méthodologie et mis en place les outils SécuRéVi, PGS, Situation Tactique, principalement dans le Département du Finistère. Il est envisagé d'ouvrir ses bénéfices à d'autres domaines. Deux prototypes sont expérimentés par des collectivités locales et territoriales de type commune et communauté de communes. Le modèle développé est le Système Documentaire d'Information Communal (SDIC) intégré dans la plate-forme SécuRéVi.

Bibliographie

Directive 96/82/CE, Journal officiel des Communautés européennes, n° L10/13, 9 décembre 1996

Loi constitutionnelle n° 2005-205, Journal officiel de la République française, n°51, 2 mars 2005, p. 3697

Lt-Colonel Mahoudo H., « Ne pas être déconnecté du monde réel », Face au risque n° 488, Décembre 2012, p.13.

Lt-Colonel Mahoudo H., Cloarec G., « Préparation à l'opération. Conceptions des plans d'établissements répertoriés », ENSOSP prévision, Tome 6bis, 2011.

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, « Programme Pédagogique National du DUT Hygiène, sécurité et environnement », 1er juillet 2010.

Tahan M., Touil A., Vareille J., Le Parc P., « La méthode de développement en X, un autre point de vue sur le cycle de vie », CFM, Besançon, Septembre 2011.

Tahan M., Vareille J., Nana L., Danjean O., Lt-Colonel Mahoudo H., Cloarec G., « Systèmes Complexes et Plan Global de Secours (P.G.S.): vers un plan global Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement (Q.H.S.E.) », CNRIUT, Tours, 2012.



Le Colonel Hervé MAHOUDO est officier de sapeurs-pompiers au SDIS29 et intervient dans le cadre des formations d'officiers à l'École Nationale Supérieure des Officiers de Sapeurs-Pompiers (ENSOSP). Le Plan Global de Secours a été développé par la Direction Expertise Recherche et Développement (DERD) du SDIS 29 qu'il a dirigé de 2007 à 2012. Il assure aussi des vacations à l'Université de Bretagne Occidentale (UBO).



Gilles CLOAREC est ingénieur Sécurité. Il a travaillé avec le Colonel Hervé MAHOUDO depuis 10 ans et a occupé la place d'ingénieur subdivisionnaire au sein de la Direction Expertise Recherche et Développement (DERD). Il est spécialiste gestion des risques et exploitation des nouvelles technologies. Il intervient régulièrement à l'École Nationale Supérieure des Officiers de Sapeurs-Pompiers (ENSOSP).



Olivier DANJEAN est le gérant de la société Inovadys, créée en 2005. Il y occupe la place d'ingénieur expert solutions. Il est diplômé de l'École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB) et travaille depuis plus d'une dizaine d'année conjointement avec le SDIS 29 et de grands groupes industriels particulièrement dans le Finistère mais aussi au niveau national et international.



Mehdi TAHAN est doctorant au Lab-STICC et ingénieur à Inovadys depuis 2012. Il a participé aux premiers travaux liés à la méthode de développement en X dès 2009 et a intégré l'équipe d'Inovadys en 2010 avant d'y poursuivre par une thèse CIFRE permettant de connecter laboratoire et entreprise.



Jean Vareille est maître de conférences à l'IUT de Brest, où il enseigne l'ingénierie mécanique au département GMP. Il est membre du Lab-STICC où il s'intéresse aux méthodes de développement de systèmes techniques basées sur l'environnement, ainsi qu'aux systèmes ubiquitaires robotisés commandés à distance.



Laurent NANA est Professeur en Informatique à l'Université de Bretagne Occidentale et membre de l'équipe SFIIS (Sécurité, Fiabilité, Intégrité de l'Information et des Systèmes) du pôle CID (Connaissance, Information, Décision) du Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la communication et de la Connaissance (Lab-STICC/UMR CNRS 6285). Ses travaux de recherches concernent la sécurité des systèmes, la sécurité des échanges de données électroniques, les architectures logicielles et la sûreté de fonctionnement logicielle des systèmes.

Les problématiques identitaires de la communication territoriale

Laurent Sempé, Jean-Paul Seloudre,

- IUT Périgueux-Bordeaux 4 – Université de Bordeaux
Département Carrières Sociales Gestion Urbaine
Site Universitaire, 24019 Périgueux

laurent.sempe@u-bordeaux4.fr ; seloudre@u-bordeaux4.fr

Sections de rattachement : 06, 71

Secteur : Tertiaire

RÉSUMÉ. La gouvernance territoriale s'inscrit aujourd'hui dans des modèles de gestion de plus en plus complexes dans le but de saisir la réalité du système : gestionnaire / acteurs (touristes, résidents, organisations,...) / identité du territoire. La communication devient aussi un outil puissant et potentiellement dangereux dans ce système « performatif » aux effets de leviers de plus en plus forts (circulation des expériences territoriales sur les réseaux).

La question de la créativité perçue de la communication territoriale sur l'authenticité perçue par les différents acteurs-cibles est posée ici de manière théorique et empirique. Une application franco-espagnole va démontrer l'existence d'effets antagonistes s'exerçant sur l'authenticité perçue. La complexité et le degré de nouveauté (perçus) induits dans la communication auront des effets négatifs sur le positionnement du territoire (au travers du concept de singularité) ainsi que sur le niveau de projection psychologique de l'individu dans les valeurs du territoire.

MOTS-CLÉS : créativité, authenticité, territoire, marketing, identité, communication.

Introduction

La communication publique territoriale s'inscrit dans un système complexe qui associe des parties prenantes très diverses (« niveaux » de gouvernance, des résidents, des touristes, des opérateurs privés...) dans des **processus de transformation** du support territorial. Ce mécanisme performatif pose pratiquement la question de l'acceptation par les acteurs des territoires des changements induits, objectifs et subjectifs. Des tensions fortes de différentes natures pourraient se manifester :

- Rejet du « *tout marketing* » pour le management public (Noisette et Vallérugo, 2010) avec ses corolaires d'accusation de « marchandisation » et de perte d'authenticité (Wachter, 2009),
- Rejet des *medias non expérientiels* pour l'interaction humaine entre les parties prenantes. Le bouche à oreille, les récits favoriseraient les « expériences narratives » des territoires au travers notamment du couple narrateur(s) / audience(s) (Bruner, 2010 ; Kahane, 2005),
- Rejet vis-à-vis du moindre *changement identitaire* du territoire (Bayart, 1996 ; Marchal, 2007) et cela au niveau des imaginaires partagés.

Or dans un contexte concurrentiel fort vis-à-vis de toutes les formes de « consommation » (tourisme, implantation d'entreprises, venue de nouveaux résidents), la tentation est forte pour les régions et les managers publics d'utiliser l'outil « créativité » dans leurs publicités pour renforcer et raffiner image, notoriété et positionnement auprès des publics ciblés. A titre d'illustration, la campagne du département français de Gironde du printemps / été 2009 sur « A la recherche du point G » est une démonstration de cette volonté de « saut créatif » (avec toute la complexité induite – avoir à l'esprit le sens de « gironde »).

La question de la légitimité (pour les parties prenantes du territoire) de toute forme de créativité dans les publicités est posée. Nous étudierons donc théoriquement et empiriquement la causalité entre la créativité perçue d'une communication territoriale, et l'authenticité perçue du territoire. Le signe du lien permet de mesurer le risque d'une diminution de cet indicateur de valeur.

Problématique

La question qui se pose dans cette recherche est très simple dans sa formulation. Elle est la conséquence d'inclinaisons multiples : l'agence de publicité, les professionnels du territoire, les acteurs du territoire. La problématique se pose donc en ces termes :

Le niveau de créativité perçu par les différents acteurs du territoire exerce-t-il un effet (positif ou négatif) sur l'authenticité perçue du territoire ?

Intérêt

Certains territoires aujourd'hui développent une démarche créative dans leurs stratégies de communication avec des objectifs divers :

- *l'agence de publicité* qui sait que sa notoriété et ses contrats futurs dépendent des « sauts créatifs » de ses communications,
- les *acteurs des territoires* qui souhaitent se positionner clairement dans l'esprit des touristes (sachant la saturation communicationnelle existante),
- La communication de territoire qui s'intègre aujourd'hui dans le cadre des nouvelles formes de *gouvernance territoriales*.

Le poids de l'image des sites est aujourd'hui considérable. Une « mauvaise réputation » peut freiner les investissements des acteurs économiques intéressés par une localisation, un environnement social et une image de marque du territoire d'accueil. Selon Bourdin (2005), les publicitaires peuvent faire le mauvais choix d'images urbaines « vendeuses », l'image doit selon lui faire « résonance » avec la sociologie, l'histoire, la culture des lieux.

Le territoire est un « produit » hors du champ du marketing traditionnel. Son mix (Chamard, 2007) est très distinct du mix du management privé (ici éléments économiques, politiques, sociaux). Du point de vue ethnologique (Alphandéry, 2004), cette intégration des acteurs du territoire est indiquée : actions publiques et politiques & le rapport à l'espace que l'individu et le groupe produisent... Il s'agit bien

d'un management systémique caractérisé par une multitude d'acteurs des sphères publiques et privées.

Evolution du problème

Les territoires vivent depuis quelques années des ruptures radicales dans leur management :

- Glissement vers des modes de management double public / privé (EPIC,...)
- Réglementation nationale en rupture très importante : communautés de communes, PNR, PLU, SCoT, trame verte et bleue...,
- Cadres européens de plus en plus larges (Natura 2000, INTERREG,...)
- Obtention des financements européens (FEDER,...) sur la base du montage de projets,

Du point de vue théorique, la prise en compte d'un marketing de la ville est un phénomène récent (Jenkins , 1999 ; Bartikowski et al., 2009 ; Barabel et al. ,2010) qui autorise la mise en place d'échelles de mesures de concept d'image de la ville (Chamard, 2007 ; Prim-Allaz et al., 2008), de personnalité de marque pour la ville et d'attitude par rapport à une destination (Bartikowski, 2008).

Complexité du problème

La gouvernance publique s'appuie sur un processus de type « performatif », qui associe de nombreuses catégories d'acteurs : politiques, touristes, résidents, professionnels du territoire, entreprises, organisations diverses, investisseurs... Ce processus a pour propriété d'être en mesure d'entraîner les changements du système. Changement d'organisation, de stratégie, de politique, d'identité (Angoulême, Bordeaux, Bruxelles), mais aussi changement des attitudes, opinions, de perceptions au niveau individuel... Selon Bourdin (2005) le territoire est un « *système en équilibre, qui associe l'espace, l'économie, la société* ».

Il se définit comme réalité éthologique, « *pratiqué et approprié par l'individu et les groupes, en reconstruction permanente* ». L'expérience urbaine devient alors un objet d'étude avec sa cohorte de processus ritualisés (Penaloza, 1998) d'assimilation et d'intégration pour les acteurs du territoire.

Etat de l'art

Deux concepts vont structurer cette analyse : la « créativité publicitaire perçue » et « l'authenticité perçue » pour le contexte territorial (marketing urbain, marketing du tourisme, marketing des services).

Le paradigme expérientiel

Le marketing a suivi une évolution paradigmatique depuis les travaux d'Otto et Ritchie (1996) qui intègrent la partie « affect » dans les modèles de consommateur. Aujourd'hui la majorité des travaux (notamment sur les thématiques de la qualité) se fonde sur l'un ou l'autre des paradigmes. De manière partielle, dans un travail sur les centres d'interprétations, De Rojas et Camarero (2007) s'appuient sur le paradigme cognitiviste et « ajoutent » une variable médiatrice liée à l'émotion. La volonté de combiner ces deux approches cognitives et émotionnelles demeure plus rare (Filser, 2008 ; Boyer et Nefzi, 2007 ; Sempé, 2010). Avec l'apport des « affects », l'expérience devient alors le concept central au marketing du tourisme (Chronis et Hampton, 2008) et des services. Selon Aurier et Passebois (2002) il serait à l'origine du bénéfice, de la satisfaction et de la valeur perçue. De nombreux concepts sont à considérer à l'aune expérientielle : l'authenticité perçue d'un territoire fait partie de ceux-là.

L'authenticité perçue

Or le territoire n'est pas un produit banal. L'authenticité perçue paraît être un concept « sensible » pour tous les acteurs du territoire, « moteur » dans le processus touristique (MacCannell, 1973 ; Naoi, 2004 ; Kolar et Zabkar, 2010) notamment pour l'évaluation globale du touriste. Une

modification de sa valence pourrait constituer un « témoin » de l'effet performatif de la créativité publicitaire. L'ancrage hautement symbolique de l'identité territoriale est de nature à produire des effets complexes sur l'authenticité perçue du territoire.

Le concept d'authenticité est marqué par une difficulté à proposer une définition « stable » (Grayson et Martinec, 2004 ; Kolar et Zabkar, 2010). Reisinger et Steiner (2006) vont même jusqu'à conclure à l'impossibilité d'utiliser un concept non défini. Graillot (2005) propose une lecture philosophique sur la base de la notion de réalité. La synthèse théorique la plus intéressante étant celle de Wang (1999) avec les trois dimensions :

- *L'original-objet* (positivisme), dans la recherche du vrai (Ecco, 1985). L'objet « patrimonial » original sert toujours de point de départ pour amorcer le processus de comparaison.
- La *projection symbolique*, constructiviste pour laquelle la « mise en scène » constitue le socle du management des loisirs (Heinich, 1999; Chhabra, 2003). Le territoire et son patrimoine sont mis en récit, racontés dans une fable élaborée. On retrouve ici les travaux d'Appadurai (1996) sur le tourisme des diasporas.
- La *dimension « existentielle »* avec le soi, le corps, la *communitas* (Hyounggon, Tazim, 2007 ; Derbaix et Decrop, 2007 ; Kim et Jamal, 2007). Les domaines artistiques sont évidemment concernés tels que les festivals, les concerts, etc. Le dictionnaire des sciences sociales s'est également emparé de cette définition « subjective » de l'authenticité (Gagnon, 2006) : *« Qualité de ce qui est intrinsèquement et éminemment vrai, l'authenticité a pris le sens, dans le tournant subjectif de la modernité, de celui qui agit par soi-même, avec sincérité et sans artifice ».*

Des expériences authentiques peuvent être vécues en sortant complètement de toute forme de marché. Le festival « burning man » (Kozinets, 2002), ou le calcul du ratio bénéfice expérience sur coût entropique de la consommation réalisé par Csikszentmihalyi (2000).

Plus généralement, de nombreux auteurs proposent des modèles globaux qui intègrent plusieurs dimensions (Wait, 2000 ; Kolar et Zabkar, 2010). Des corrélations existent entre les parties objectives et subjectives de l'authenticité (Grayson, Martinec, 2004). L'échelle de Camus (2004)

que nous adapterons pour notre étude du territoire fait partie de ces échelles multidimensionnelles qui servent de support aux modèles avec variables latentes (SEM, LV-PLS). Les deux premières dimensions sont celles du produit et de la projection psychologique (en référence au concept de soi « étendu »). La troisième dimension choisie par Camus (2004) est la « singularisation » du produit qui intègre les éléments de discriminance qui différencie le produit par rapport à la concurrence.

L'authenticité assume aussi une fonction performative sur le territoire. Tous, touristes (l'étranger), résidents, élus, professionnels recherchent ce prisme de la « vérité ». Une fois admise l'authenticité (indexicalité selon Peirce – Grayson et Martinec, 2004 –) le système-territoire se met en fonctionnement : Marié (2011) a démontré la fonction d'« accélérateur d'identité » assumée par l'étranger dans le trio terroir / indigène / étranger. L'identité, l'image, la personnalité du territoire se valident dans ce jeu.

La créativité perçue publicitaire

Le système « territoire » est aujourd'hui intégré dans le cadre d'un management rigoureux et à double modalité (gestion privée et publique). La communication résulte de stratégies définies avec la recherche d'effets sur les variables du marketing : positionnement, image, personnalité de marque... La question de l'introduction de la composante créativité se pose ici avec son impact sur l'authenticité perçue du territoire par l'ensemble des acteurs parties prenantes du système.

La littérature sur la créativité en publicité est relativement récente. Le nombre de travaux est peu important.

Aujourd'hui le corpus se scinde en deux courants distincts (Smith et al., 2007).

- La première approche prend la créativité publicitaire comme « ***niveau de divergence*** ». Les dimensions de la Divergence sont pour Smith et al. (2007) : l'originalité, la flexibilité, la synthèse, l'élaboration, la valeur artistique. Mercanti-Guérin (2008) – dont nous retiendrons l'échelle – considère comme cadre théorique trois dimensions : la *nouveauté*, la *complexité* (de plus en plus utilisée comme vecteur de communication), *l'esthétique*.

- La deuxième approche théorique va ajouter un deuxième concept : la ***pertinence de la publicité créative pour le consommateur*** (Besemer et O'Quinn 1986 ; Haberland et Dacin, 1992). Pertinence publicité / consommateur (son univers culturel) et la pertinence marque / consommateur (utilisation de la marque dans des circonstances familières). La pertinence juge la publicité à l'aune de sa capacité à connecter le consommateur du fait de la qualité de l'adéquation établie entre les univers symboliques. Le concept de « congruence de soi avec la destination » utilisé par Bartikowski et al. (2008) s'apparente au lien marque / consommateur.

L'échelle retenue dans ce travail est celle de Mercanti-Guérin (2008), mais le recours au concept d'authenticité perçue dans le modèle testé est un moyen de tester de manière indirecte l'effet de pertinence consommateur / publicité pour le territoire concerné. Enfin Smith et al. (2008) ont pu démontrer l'effet premier de la divergence sur l'entièreté du modèle HOE (hiérarchie des effets). Cela renforce l'intérêt de la créativité comme outil de valorisation du territoire.

Système d'hypothèses

Le « signe » du lien (positif ou négatif) entre la créativité et l'authenticité est traité de manière indirecte dans la littérature.

Pour le marketing, Bartikowski et al. (2008) ont validé un lien positif de la « congruence de soi avec la destination » et « l'attitude globale » par rapport à la destination. Peut-on supposer qu'une rupture de cette congruence (par le biais d'une communication territoriale ratée) dégraderait l'attitude envers le territoire ? Comme aurait pu le faire la communication « Avez-vous trouvé votre point G ? » de la Gironde. Dans le domaine publicitaire, Smith et al. (2008) valident un lien positif entre créativité et éléments du modèle HOE, ce qui milite pour un lien positif entre créativité et authenticité perçue du territoire. En sociologie, Bourdin (2005) rappelle les théories de « l'agir communicationnel » de Habermas pour évoquer la nécessité d'un processus délibératif pour la production d'une communication territoriale. L'image de la ville est une image partagée et présente dans les supports physique et mentaux de la mémoire collective. Pour Halbwachs (1925) « *la mémoire n'existe que dans*

l'interaction avec le groupe, et dans les « objets » qui nous entourent... Hors du groupe et du cadre spatial (les monuments d'une ville,...) le souvenir s'étirole, se rétrécit, se déforme (que ce soit pour les souvenirs d'enfance, ou d'adulte) ». Cette vision de la mémoire collective est intégratrice et fonde à penser que les ajustements mutuels s'opèrent toujours entre les décisions de tous les acteurs du territoire : là encore les risques d'effets négatifs sur l'authenticité sont soulignés.

Le problème survient lorsqu'une disjonction s'opère entre « *espace conçu* » (politiques urbaines) et « *espace vécu* » (espace des représentations, des pratiques) selon la terminologie de Lefebvre (2000) cité par Stébé et Marchal (2010). Pour Noisette et Vallérugo (2010), l'image du territoire doit-être imaginée autant que vécue avec un storytelling efficace (succès de « Onlylyon », échec de la campagne pour la Sarthe « en Sarthe on n'a pas froid aux yeux »).

Pour tenter de faire une synthèse de ces informations multiples : effet positif évoqué gagé par le champ publicitaire, effet négatif anticipé par le champ territorial. Nous postulons un EFFET NEGATIF de la « créativité publicitaire perçue » sur « l'authenticité perçue » du territoire (option choisie également par le Conseil Général de Dordogne).

Validation empirique

Deux points structurent ce paragraphe : présentation de la méthode puis des résultats.

Méthode empirique

L'enquête a porté sur 198 répondants, étudiants et enseignants (partagés entre 85 français et 113 espagnols).

Pour les étudiants français deux régions ont été testées (une campagne créative sur les deux) : la Gironde avec sa campagne « Avez-vous trouvé votre point G ? », la Lorraine avec une campagne classique. Après présentation des campagnes de communication, les étudiants sont soumis au questionnaire. *Le public espagnol* a suivi le même protocole après avoir visionné deux extraits de campagnes de communication pour

l’Espagne à destination du public (une créative et l’autre non créative) et la campagne explicitement créative du Nouveau Paris (couples s’embrassant sur des toiles de fond parisiennes) perçue par eux comme « trop décalée, « négatives », « Paris ce n’est pas que ça... ».

	Campagnes de communication	
	Créative	Non créative
Etudiants français	Bordeaux Point G	Lorraine
Etudiants catalans	Nouveau Paris (« Toi, moi et Paris » ; « Vous n’avez jamais été aussi près ») Touché par la Catalogne (campagne Spain Marks)	Campagne « Bravo l’Espagne » publicité sur Barcelone

Tableau 1. *Deux types communications territoriales*

La méthode empirique est celle des modèles PLS à variables latentes (LV-PLS). Deux variables latentes de niveau II sont utilisées :

- **Créativité publicitaire perçue**, avec trois sous-variables latentes : *complexité (5 questions)*, *esthétique (3questions)*, *nouveauté (3 questions)*. Les items de Mercanti-Guérin (2008) ont été conservés exactement.
- **Authenticité perçue du territoire** avec trois sous-variables latentes : *origine (5 questions)*, *projection psychologique du consommateur (4 questions)*, *singularité (3 questions)*.

L’échelle d’authenticité perçue du territoire devient (exemple Lorraine) :

Origine :

La région Lorraine possède une nature préservée

Le patrimoine de la Lorraine est un vrai livre d'histoire
Les racines identitaires de la Lorraine sont très authentiques
La culture lorraine est un atout très fort pour cette région
Les Lorrains sont très fiers de leur appartenance à cette région

Projection psychologique :

La culture de la Lorraine reflète un peu ma personnalité
Je peux me définir fortement par les valeurs de la Lorraine
Partager le mode de vie lorrain m'aiderait à être moi-même
La culture lorraine, c'est mon style

Singularité du territoire lorrain :

La culture et de le mode de vie lorrains sont uniques
Le territoire de la Lorraine est unique en son genre
Il n'y en a pas d'autres régions comme celle de la Lorraine

Nous utiliserons SmartPLS 2.0 beta (Ringle C.M., Wende S., Will A., 2005) pour estimer le modèle par la méthode LV-PLS (PLS path modeling). Systématiquement nous aurons recours à un Bootstrapping (Tenenhaus, 2005) avec 1000 réplifications pour obtenir une estimation des erreurs standards. Enfin deux modèles seront testés successivement : le modèle de rang 2 (avec les deux variables « créativité perçue » et « authenticité perçue »), puis le modèle de rang 1 sans les deux variables latentes précédentes d'ordre supérieur.

Modèle hiérarchique de rang 2

Ce modèle repose sur un niveau hiérarchique d'ordre 2.

- Variables latentes de rang 1 : nouveauté, complexité, esthétique & origine, projection psychologique et singularité ; ces variables étant reliées à leurs variables manifestes,
- Variables latentes de rang 2 : la créativité perçue d'une communication (reliée à nouveauté, complexité, esthétique) et

l'authenticité perçue d'un territoire (reliée à origine, projection psychologique et singularité),

Les variables latentes de rang 2 seront estimées grâce aux variables de mesures déjà utilisées au rang 1 (elles sont apurées par le biais de l'Alpha de Cronbachs). La causalité du modèle va être estimée au rang 2 par le lien établi entre les variables latentes « créativité perçue » et « authenticité perçue »

Résultats du modèle de hiérarchique de rang 2

	AVE	C.R	R Square	Cronbachs Alpha
AUTHENTICITE	0,62	0,93	0,07	0,92
CREATIVITE	0,50	0,87		0,83
Complexité	0,75	0,86	0,42	0,66
Esthétique	0,87	0,93	0,66	0,86
Nouveauté	0,72	0,88	0,80	0,80
Origine	0,78	0,88	0,44	0,72
Projection	0,83	0,95	0,91	0,93
Singularité	0,77	0,91	0,69	0,85

Tableau 2 . Indices de qualité du modèle de rang 2

- Validité nomologique : l'indice de la qualité de l'ajustement global supérieur au seuil de 0,36 (Tenenhaus et Al., 2005) : GoF = 0,67 est très bon.
- La fiabilité des construits exige un AVE (moyenne des variances extraites) > 0,5 (Chin, 1998), la créativité perçue est juste à 0,5 indiquant une variance extraite faible,
- Validité discriminante : problème de discriminance important pour la créativité perçue avec des variances entre construits supérieures à la

variance de chaque construit (AVE). Ensuite l'authenticité perçue, la nouveauté et la projection psychologique dans le territoire sont également non discriminant.

Le construit créativité perçue pose un problème pour l'ajustement de ce modèle. **La « créativité perçue » ne valide pas les critères de DISCRIMIANCE** : il s'agit d'un problème THEORIQUE grave de définition du concept (donc de construction d'échelle).

Nous allons mettre notre modèle au niveau 1 (à plat) pour tenter de comprendre cet effet négatif qui va en sens inverse des effets positifs des autres concepts de la créativité perçue.

Modèle hiérarchique de rang 1

Le modèle de rang 1 (sans les concepts de rang 2 – « créativité perçue » et « authenticité perçue ») donne les résultats suivants :

- Fiabilité des construits (coefficient de Cronbachs > 0,7). Après épuration des variables de mesure, on constate une **très bonne pertinence** des indicateurs de mesure (moyen pour la complexité). La communauté (communality) est proche de 1 ce qui traduit la très bonne proportion de variance expliquée pour les variables latentes (VL) par leurs variables de mesure (VM).
- Validité convergente : $AVE > 0,5$ (variance moyenne partagée entre une variable latente et ses mesures) : le problème de validité convergente que nous avions avec le modèle hiérarchique de niveau 2 a disparu. L'analyse des causalités entre nos six variables latentes nous apportera des éclaircissements quant à la construction du concept de créativité perçue.
- Validité discriminante. La variance construit (AVE) < variance entre construit.

Validité discriminante parfaite.

- Validité nomologique : indice de *qualité globale du modèle* : $GoF = 0,37 > \text{seuil de } 0,36$ (Tenenhaus et Al., 2005).

Le modèle de rang 1 est donc valide à l'opposé du modèle de rang 2. Cela signifie que la définition des concepts a posé un problème théorique qu'il faut identifier.

Résultats

Les résultats théoriques et pratiques sont proposés dans ce paragraphe. Nous finirons par présenter les conclusions issues de la segmentation internationale.

Les résultats théoriques

Ils concernent le problème de définition du concept de créativité publicitaire perçue. Les éléments théoriques validés par Mercanti-Guérin (2008) s'appuyaient sur les trois sous-dimensions complexité, esthétique et nouveauté. L'auteur rappelait le niveau croissant du recours des publicitaires à la dimension « complexité » qui assure un démarquage fort aux produits et aux marques. Dans ce travail, le problème de la validité discriminante de l'échelle s'est avéré très nettement dans la comparaison des corrélations entre variables latentes, comparées à la racine carrée des AVE (variance moyenne par construit).

Le point suivant va nous permettre de comprendre l'origine de ce problème de discriminance : complexité de la publicité et nouveauté de la publicité agissent négativement sur la singularité du territoire.

Résultats pratiques

Les causalités entre les variables latentes sont les suivantes :

	Origine	Projection	Singularité
Complexité	0,2	0	-0,11
Esthétique	0,32	0,43	0,45
Nouveauté	0,11	-0,16	-0,17

Tableau 3 . *Matrice des causalités entre variables latentes*

Il existe donc des effets opposés qui se mettent en place dans ce modèle :

- Effets positifs FORTS : **l'esthétique perçue de la publicité** agit sur les trois V.L. de l'authenticité. C'est la « valeur sûre » de la

communication : le beau agit en toutes circonstances sur la perception de l'authenticité d'un patrimoine. Comme une sorte de variable universelle pour le management...

- Effets négatifs importants : la **complexité de la publicité** et la **nouveauté perçue de la communication** ont des effets négatifs sur la *projection psychologique* dans le territoire et sur la *singularité* (en quelque sorte le positionnement) de ce territoire. Ces deux variables sont pourtant des variables très usitées pour le recours à la créativité dans les communications.

L'hypothèse d'effet négatif de la créativité publicitaire perçue sur l'authenticité perçue du territoire s'avère être en grande partie validée. Les acteurs du terroir (publics étudiants) ne sont pas en mesure d'effectuer l'opération mentale d'assimilation d'éléments de *complexité* et / ou de *nouveauté* pour une communication territoriale. S'agit-il plutôt d'un problème de capacité à élaborer, ou de niveau d'implication selon les facteurs du modèle ELM présentés par Petty et Cacioppo (1984) ? De Barnier (2004) rappelle que les facteurs de « performance cognitive » sont individuels mais aussi situationnels : or, les étudiants interrogés l'ont été dans un environnement dans lequel l'effort cognitif est valorisé...

Le « blocage » des répondants au niveau stéréotypal peut-être une manifestation de l'effet de persistance des stéréotypes identifiés dans la recherche en psychologie sociale (Légal, Delouée, 2008). Les biais de confirmation font partie de ces mécanismes de tri de l'information selon leur niveau de consonance. « *La catégorie est représentée en mémoire par un prototype : il s'agit de l'élément le plus représentatif d'une catégorie et qui partagerait le plus grand nombre d'attributs avec les autres membres de la catégorie* ».

On comprend alors les « prototypes » manquant de modernité pour l'ensemble des étudiants :

- Par exemple « on mange bien en Dordogne »,
- La Catalogne reste d'abord un territoire de soleil et de plages,
- Paris est indissociable de la « tour Eiffel », (« Koons ou le mur végétal du Quai Branly apparaissent décalés).

Un modèle intéressant relativement à type de traitement de l'information qui reste très en surface des stéréotypes est le modèle MAC (Ambler et Burne, 1999). Le traitement de l'information se fait à l'un des niveaux suivants (du plus simple au plus complexe) :

1/ les éléments de *mémorisation* passés (les prototypes de la catégorie « terroir »),

2/ les *affects* (donc le niveau émotionnel),

3/ la *démarche cognitive* plus rationnelle qui intervient en dernier, surtout pour des communications s'appuyant sur des éléments d'affect (publicité affect meilleures que les pubs cognitives en termes de mémorisation selon les auteurs).

Les éléments « complexité » et « innovation » des publicités créatives sont demeurés aux niveaux 1/ et 2/ du modèle MAC. L'élaboration cognitive (étape 3/) ne semble pas mise en œuvre dans le traitement de l'information. Cela passe par **l'attribution des attributs, nouveaux ou complexes de la publicité, par le biais de la projection psychologique et de la singularité perçue (positionnement et identité actuels)**. C'est donc un ***problème d'attribution des nouveaux attributs pour la catégorie (région)*** qui est la cause de l'effet négatif de la « complexité perçue » et de la « nouveauté perçue » de la publicité territoriale. L'attribut « esthétique » reste cantonné au niveau 2/ du modèle MAC ; mais cela convient **au principe du beau qui agit surtout sur la dimension affective**. Le « beau » semble être un critère de communication caractérisé par un certain « universalisme » : stable dans le temps et l'espace.

La communication territoriale doit pouvoir s'en emparer dans les principes de construction des supports qui s'appuient sur une stratégie de créativité. Ce recours au beau pourra donc assurer un effet positif sur les deux dimensions cruciales de l'authenticité territoriale perçue :

- La ***projection psychologique des acteurs*** dans les valeurs et les codes symboliques du « terroir ». Le marketing territorial est marqué par la puissance des représentations mentales partagées par les membres du groupe (effet de congruence dans les groupes – Friedkin, 1993 -). La notion de prototype de la psychologie

sociale (Légal, Delouée, 2008) renvoie à cet imaginaire de groupe, à cette « mémoire collective » (Halbwachs, 1925), qui exerce des effets très forts sur l'attachement au territoire. Cette variable réagit donc négativement à la « nouveauté perçue » d'une communication territoriale. Cette relation négative traduit les résistances symboliques qui unissent les acteurs et leur territoire : la nouveauté doit-être perçue comme une trahison entre le lieu symbolique et l'individu et le lien avec ce lieu doit-être inscrit dans la fidélité aux valeurs reconnues. La nouveauté ne peut donc être légitime : Toulouse capitale du rugby, Périgord gastronomique, Saint Malo la corsaire, etc.

- La ***singularité perçue du territoire*** est la deuxième variable qui réagit négativement à la complexité et à la nouveauté et positivement à l'esthétique. Cette singularité marque le positionnement du territoire. Elle représente à ce titre une dimension essentielle du marketing territorial. Cette variable est liée à la misère cognitive des consommateurs (Miller, 1956) eu égard aux informations disponibles pour évaluer et juger des sites. L'intensification de la concurrence mondiale sur le marché du tourisme impose aujourd'hui un contrôle strict du positionnement.

Segmentation internationale

Le modèle complet de niveau hiérarchique 1a été relancé avec la procédure LV-PLS du logiciel SMART-PLS. Cela nous permet d'observer que des différences (peu nombreuses) existent entre français et espagnols :

Causalité étudiée :	Espagne	France
Complexité ► Origine	0,18	0,33
Complexité ► Projection	0,05	0,23
Complexité ► Singularité	-0,12	0,05
Esthétique ► Origine	0,31	0,26
Esthétique ► Projection	0,17	0,34
Esthétique ► Singularité	0,23	0,44
Nouveauté ► Origine	0,04	0,21
Nouveauté ► Projection	-0,03	-0,02
Nouveauté ► Singularité	0,1	-0,24

Tableau 4 . Causalités entre concepts selon nationalité (LV-PLS)

Du point de vue des **effets d'interculturalité**, il apparaît une différence entre les échantillons français et espagnols.

- Le *public français* enquêté s'est montré plus réceptif que le public espagnol à l'effet négatif entre la « nouveauté » et la « singularité » (- 0,24). Cela pourrait indiquer une volonté de ne pas accepter le changement pour ce qui concerne les « identités territoriales » (un vieil atavisme chauvin ?). A l'inverse, un lien positif s'établit entre « complexité » et « projection » (0,23) dont la contrepartie n'existe pas pour le public espagnol. Ce frein vis-à-vis de la « nouveauté » associé à une relation plus positive avec la « complexité » perçue pour la publicité pourrait être le corollaire d'un traitement de l'information du modèle MAC de Ambler et Burne (1999) plus au niveau 3. Mémorisation ► émotions ► traitement cognitif : le traitement de la complexité s'établit effectivement dans ce modèle au troisième niveau. Nos français sondés auraient ainsi un profil plus émotionnel / cognitif dans l'évaluation de l'authenticité perçue des territoires.
- Le *public espagnol* enquêté a manifesté plus de négativité dans la relation entre « complexité » et « singularité » (- 0,12). Cela

indique une « neutralité » vis-à-vis de la « nouveauté perçue » et donc une moindre volonté de résistance que l'échantillon français. Le blocage se situe plutôt dans le degré de « complexité perçue » de la communication. Peut-être la manifestation d'un traitement de l'information qui ne « descend » pas au niveau 3/ (élaboration cognitive) du modèle MAC de Ambler et Burne (1999). Le traitement de l'information espagnol pour notre échantillon pourrait s'apparenter à un processus « stéréotype – émotions » : les éléments disponibles en mémoire s'associent à de l'affect pour produire l'évaluation de l'authenticité du territoire.

Le succès désigne la survenue d'un effet performatif du système Acteurs / territoire / gouvernance.

Préconisations :

Ce type de frein paraît être lié à un processus grégaire : les attributs de l'identité du territoire sont partagés par les autres membres du groupe. Or la communication est perçue comme une source d'information exogène, non rattachée directement au groupe. La modification des critères de validation de l'identité d'un territoire doit peut-être supporter un processus de validation par un des leaders charismatiques du territoire, pour lesquels les niveaux d'acceptation des informations nouvelles restent plus élevés.

Limites et voies de recherche

Les limites de cette étude concernent bien entendu le protocole empirique mené : des échantillons de plus grande importance et au-delà du contexte universitaire (échantillon de convenance), extension de la comparaison internationale à d'autres types pays selon la segmentation interculturelle de Hofstede (1980). Du point de vue théorique, un modèle par divergence a été retenu avec le travail de Mercanti-Guérin (2008). Le développement des modèles DxR (divergence x pertinence) de Smith et Al. (2007) serait certainement un moyen supplémentaire de se rapprocher

des notions de « congruence de soi » évoqués par Bartikowski et Al. (2008). Cela permettrait d'améliorer encore la compréhension des phénomènes identitaires associés au territoire. Du point de vue théorique encore, le « blocage » des répondants sur la dimension projective de l'authenticité des territoires impliquerait des réflexions sur la partie I (imitation) du modèle LISA Q de Derbaix et Grégory (2004). Les auteurs ont mené une analyse approfondie de cette dimension essentielle de la persuasion, car très identitaire au niveau des territoires. Enfin l'amélioration des méthodologies de segmentation FIMIX-PLS serait en mesure d'approfondir la connaissance des patterns de comportements du consommateur avec des procédures qui réduisent la sensibilité concernant la non-normalité des données.

Conclusion

La gouvernance territoriale reste marquée par la gestion des « prototypes » associés aux représentations partagées avec les autres membres du groupe. Cette étude a montré que la créativité publicitaire pouvait dans ce secteur supporter des *freins importants* qui viennent contrarier et s'opposer aux tentatives d'évolution des « identités locales ». Ces blocages sont notamment la conséquence d'un *refus de se projeter dans une identité territoriale* modifiée de manière unilatérale. Le changement doit-être organisé et géré de manière non radicale, mais progressive et lente. Il doit intégrer les acteurs du territoire dans le cadre d'une démocratie « participative » qui puisse amener chacun à accepter les trajectoires futures. Ainsi, si un lien positif relie l'esthétique de la communication des territoires et l'authenticité perçue par ses acteurs, la causalité devient parfois négative en cas de complexité ou de nouveauté perçue de la communication. Enfin une approche typologique a pu être menée qui valide la segmentation par le genre, puis la segmentation internationale. Les causalités des modèles diffèrent selon le critère de segmentation retenue.

Dans ce cadre, les acteurs du territoire doivent être en mesure de programmer et de contrôler la disparition des causalités négatives entre les protocoles choisis pour leurs communications et la réception de ses différentes cibles. Ces « causalités négatives » peuvent être lourdes de conséquences dans le contexte managérial actuel avec le développement

exponentiel de toutes les formes de tourisme. La mise en réseau des touristes a aujourd'hui démultiplié les effets du processus de bouche à oreille : blog, réseaux sociaux, commentaires des sites sur les applications des téléphones mobiles,...

Cette recherche aura resitué l'effet de la communication sur l'authenticité perçue dans le cadre plus vaste d'un système territorial. L'étude des effets performatifs du système acteurs / territoire / gouvernance est au cœur de ce travail avec l'étude des effets d'accélération (Marié, 2011), ou de freinage retransmis de manière intéressante par le concept central de l'authenticité, indicateur de « valeur » *réelle, construite, ou vécue* pour les territoires.

Bibliographie

Alphandéry Pierre, « Territoires en questions : pratiques des lieux, usages d'un mot », *Ethnologie française*, 32, 2004, 5-12

Ambler T. et Burne T., "The impact of affect on memory of advertising", *Journal of Advertising Research*, 39, 2, 1999, p. 25-34.

Appadurai A., Après le colonialisme. Les conséquences culturelles de la globalisation, traduction française 2001, Payot.

Aurier P. et Passebois J., « Comprendre les expériences de consommation pour mieux gérer la relation client », *Décisions marketing*, 28, octobre-décembre, 2002, p. 43-52.

Barabel M. et al., « Les médias sociaux au service du marketing territorial : une approche exploratoire », *Management & Avenir*, 2010/2 n° 32, 2010, p. 233-253.

Bartikowski B., Merunka D. et Valette-Florence P., « L'attitude vis-à-vis des destinations touristiques : le rôle de la personnalité des villes », *Revue management et avenir*, 4, n° 18, 2008, p. 72-87.

Bartikowski B., Merunka D., Ouattara A. et Valette-Florence P., « Les villes ont-elles une personnalité ? », *Revue Française de Gestion*, 197, 2008, p. 49-64.

Besemer S.P., and O'Quinn K., "Analyzing Creative Products: Refinement and Test of a Judging Instrument", *Journal of Creative Behavior*, 20 (2), 1986, p. 115-126.

Bourdin A. (2005), *La métropole des individus*, Editions de l'aube.

Boyer A. et Nefzi A., « La perception de la qualité dans le cadre d'une consommation de nature expérientielle », *Market Management*, 1, n° 5, 2007, p. 4-27.

Camus S., « Proposition d'échelle de mesure de l'authenticité perçue d'un produit alimentaire », *RAM*, vol.19, n°4, 2004, p. 39-63.

Chamard C., « l'évaluation de l'image de marque d'une ville : création d'une échelle de mesure capital-citoyen », Actes du congrès de l'association française du marketing, 2004, Saint-Malo.

Chin, W. W.. "Issues and opinions on structural equation modeling". *MIS Quarterly*, 22(1), 1998, p. 7-26.

Chronis A. and Hampton R.D., "Consuming the authentic Gettysburg: How a tourist landscape becomes an authentic experience", *Journal of Consumer Behaviour*, 2008, p. 111-126

Cousin S., Réau B., « L'avènement du tourisme de masse », *Sciences Humaines*, Les grands dossiers des sciences humaines, n°22, 2011, p. 52-55.

Cova V. and Cova B., "Les particules expérientielles de la quête d'authenticité du consommateur", *Décisions Marketing*, 28, October-December, 2002, p. 33-42

Csikszentmihalyi M., "The costs and benefits of consuming", *Journal of Consumer Research*, 27 (sept), 2000, p. 267-272.

De Barnier V., « Le modèle ELM : bilan et perspectives », *Recherche et Applications en Marketing*, vol. 21, n° 2, 2004, p. 61-82.

De Rojas C., Camarero C., "Visitors' experience, mood and satisfaction in a heritage context: Evidence from an interpretation center", *Tourism Management*, n°25, 2007, p. 525-537.

Derbaix C. et Gregory P., *Persuasion : la théorie de l'irrationalité restreinte*, Paris, 2004, Economica.

Dortier J.F., « la publicité nous manipule-t-elle ? », *Sciences Humaines*, Les grands dossiers des sciences humaines, n°22, 2011, p. 59-63.

Durand, Weil, *Sociologie contemporaine*, 1999, Vigot.

Eco U., *La guerre du faux*, Paris, 1985, Grasset.

Filser M., « Décision, expérience et valeur de consommation – esquisse d'un nouveau cadre théorique pour l'analyse du comportement du consommateur », *Sciences de Gestion*, 64, 2008, p. 27-41.

Fornell C. and Larker D., "Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error". *Journal of Marketing Research*, 18(1), 1981, p. 39-50.

Friedkin N.E., "Structural Bases of Interpersonal Influence in Groups: a Longitudinal Case Study", *American Sociological Review*, Volume 58, December, 1993, p. 861-872.

Gagnon Bernard (2006), *Le dictionnaire des Sciences Humaines*, Quadrige, PUF.

Graillot L., « Réalités (ou apparences ?) de l'hyperréalité : une application au cas du tourisme de loisir », *Recherche et Applications en Marketing*, vol. 20, n°1, 2005, p. 43-63.

Greyson K. and Radan M., "Consumer Perceptions of Iconicity and Indexicality and Their Influence on Assessments of Authentic Market Offerings", *Journal of Consumer Research*, 31 (September), 2004, p. 296-312.

Haberland G.S. et Dacin P.A., The development of a measure of assess viewers' judgments of creativity of an advertisement: a preliminary study, *Advances in Consumer Research*, 19, 1, 1992, 817-825.

Halbwachs M., *Les cadres sociaux de la mémoire*, Albin Michel, Bibliothèque de l'évolution de l'humanité, 1925, 2004.

Heinich Nathalie, « Art contemporain et fabrication de l'inauthentique », *Terrain* 33, Septembre 1999, p.5-16.

Hofstede G., *Culture's consequences: International differences in work related values*. Newbury Park, CA: Sage. 1980.

Hyounggon K., Tazim J, Touristic quest for existential authenticity, *Annals of Tourism Research*, Vol. 34, No. 1, 2007, p. 181-201.

Jenkins O. H. "Understanding and measuring tourist destination images", *International Journal of Tourism Research*, vol. 1, n° 1, 1999, p. 1-15.

Kolar T., Zabkar V., "A consumer-based model of authenticity: an oxymoron or the foundation of culture heritage marketing?", *Tourism Management*, 31, 2010, p. 652-664.

Kozinets R. "Can Consumers Escape the Market: Emancipatory Illuminations from Burning Man", *Journal of Consumer Research*, 29, June 2002, p. 20-38.

Légal J.B., Delouée S., Stéréotypes, préjugés et discrimination, Dunod, Collection Les Topos, 2008.

MacCannell, Dean, "Staged Authenticity: Arrangement of Social Space in Tourist Settings", *American Journal of Sociology*, 79, 1973, p. 589-603.

Marié M., L'anthropologue et ses territoires. Qu'est-ce qu'un territoire aujourd'hui ?, <http://www.michel-marie.eu/territoire.html>, 2011.

Mercanti-Guérin M., « Perception d'une annonce créative par le consommateur : construction et validation d'une échelle de mesure ». *Recherche et Applications en Marketing (RAM)*, vol.23, n°4, 2008, p. 97-119.

Miller G.A., « The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information », *Psychological Review*, vol. 63 (2), 1956, p. 81-97.

Naoi T., "Visitors' evaluation of an historical district: the roles of authenticity and manipulation", *Tourism and Hospitality Research*, 5(1), 2004, p. 45-63.

Otto, Ritchie, "Service Experience", *Tourism Management*, 17/3, 1986, p. 165-174.

Pahl Ray, « Toutes les communautés sont-elles imaginées ? », *Ethnologie française*, XXXVII, 2007, p. 223-232.

Penazola L., "Just Doing It: A Visual Ethnographic Study of Spectacular Consumption Behaviour at Nike Town" *Consumption, Markets and Culture*, Volume 2, Number 4, 1998, p. 337-465.

Petty E., Cacioppo J., "Source factors and the elaboration likelihood model of persuasion", *ACR*, 2004, p. 668-672.

Prim-Allaz I., Ricard L., Courvoisier F., Khadir-Poggi Y., « Quels liens entre l'image du pays et l'image de l'une de ses villes ? Application au cas de la France et de Lyon », 4^{ème} journée thématique de recherche en marketing du tourisme et des loisirs, Chambéry, 2008, p. 1-22.

Reisinger, Y. and Steiner C., "Reconceptualizing Object Authenticity". *Annals of tourism Research*, 33, 2006, p. 65-86.

Ringle C., Wende C. and Will A., « SmartPLS 2 (beta) », <http://www.smartpls.de>, Hamburg, Germany, 2005.

Sempé L., « Mesure de la qualité perçue d'un patrimoine culturel », Colloque « Patrimoine culturel et désirs de territoires : vers quels développements ? », CNRS / Université Paul Valéry Montpellier, 2010, Université de Nîmes.

Smith R., Chen J. et Yang X., "The impact of advertising creativity on the hierarchy of effects". *Journal of Advertising*, vol. 37, n°4, 2008, p. 47-61.

Smith R., MacKenzie S., Yang X., Buchholz L., Darley W., "Modeling the Determinants and Effects of Creativity in Advertising", *Marketing Sciences*, Vol. 26, No. 6, November-December 2007, 2007, p. 819-833.

Stébé J.M., Marchal H., La sociologie urbaine, PUF, 2^{ème} édition, 2010.

Tenenhaus M., Vinzi V.E., Chatelin Y.M., Lauro C. « PLS path modeling & Data Analysis », *Computational Statistics*, 48, 2005, p. 159 – 205.

Wang N., Rethinking Authenticity in Tourism Experience, *Annals of Tourism Research*, Vol. 26, n°2, 1999, p. 349-370.

Mini CV et photo de tous les auteurs



Jean-Paul Seloudre. Agrégé de Lettres Modernes – Laboratoire MICA (Médiation Information Communication Arts) à université Bordeaux 3. Thèse en voie d'achèvement portant sur « La pertinence des éléments du patrimoine dans les publicités territoriales et institutionnelles ».

Auteurs d'articles sur :

- Médiation et patrimoine,
- Médiation et tourisme.

Ouvrages écrits sur la littérature contemporaine.



Laurent Sempé. Enseignant-chercheur Sciences de Gestion – Laboratoire Markirgo Bordeaux 4. Thèse ayant porté sur l'influence des réseaux sociaux sur la fidélité bancaire.

Thématiques de recherche actuelles :

- Echelle de mesure de *l'expérience narrative* perçue,
- Mesure de la « *distance psychique* » du touriste,
- *Management des territoires*

Approche pluridisciplinaire pour la conception de systèmes sociotechniques résilients

Philippe Rauffet*, Gael Morel, Christine Chauvin**, Pascal Berruet***

*IUT de Lorient / Lab-STICC UMR CNRS 6582 – Université Bretagne Sud
10 rue Jean Zay, 56100 LORIENT*

** Département Qualité Logistique Industrielle Organisation*

*** Département Hygiène Sécurité Environnement*

*philippe.rauffet@univ-ubs.fr, gael.morel@univ-ubs.fr,
christine.chauvin@univ-ubs.fr, pascal.berruet@univ-ubs.fr*

Sections de rattachement : 61, 16

Secteur : Secondaire / Tertiaire

RÉSUMÉ. Cette communication a pour objectif d'illustrer les travaux réalisés à Lorient autour des problématiques de coopération et de répartition du travail entre l'homme et la machine. Pluridisciplinaire, la réflexion implique des membres de l'équipe IHSEV et de l'équipe MOCS du Lab-STICC, appartenant à différents départements de l'IUT de Lorient (QLIO, HSE). D'autre part, elle s'attaque à des enjeux spécifiques auxquels sont confrontés des entreprises fortement ancrées sur le territoire local.

MOTS-CLÉS : Coopération Homme-Machine, Allocation dynamique des fonctions, reconfiguration, opérations

1. Introduction

L'accroissement de la complexité des systèmes, la forte automatisation des tâches et la multiplicité des configurations organisationnelles génèrent de nouveaux défis industriels et scientifiques. Ce nouveau contexte amène une transformation des objectifs et des approches de conception. Les systèmes complexes sont dorénavant vus comme des systèmes sociotechniques, dans lesquels les composantes humaines,

techniques et organisationnelles sont fortement inter-reliées (Baxter and Somerville, 2011). D'autre part, la résilience devient un critère fondamental pour la conception et le pilotage de ces systèmes. Cette propriété est définie comme la capacité du système à conserver ou à recouvrer rapidement un état d'équilibre, cela afin de poursuivre son activité avec des niveaux de performance et de sécurité acceptables, cela même après un accident majeur ou en présence de pressions continues et importantes (Wreathall, 2006).

Cette nouvelle donne soulève particulièrement la question du rôle des opérateurs face à des systèmes techniques de plus en plus autonomes. La coopération et le partage cognitif entre l'homme et la machine deviennent en effet polymorphes, suivant une logique « augmentative » - où l'automatisation accroît le nombre de ressources sur une tâche et améliore donc la capacité de production – ou bien « confrontative », voire « intégrative » - où l'on observe une complémentarité de l'homme et la machine pour le contrôle ou pour la réalisation de la tâche (Hoc, 1996). La répartition des activités entre l'homme et la machine - appelée « allocation des fonctions » - devient alors un processus central dans la conception et dans le pilotage des systèmes.

Cependant, les démarches de conception classiques, encore très techno-centrées (Chauvin et Hoc, à paraître) ne suffisent plus. Ils ne considèrent pas ou peu l'allocation des fonctions et uniquement de manière statique. Cela risque d'aboutir à des systèmes non résilients, où les interactions entre l'homme et la machine sont limitées et parfois inadaptées à une situation de travail dynamique.

Cet article vise donc à proposer une méthode et des outils pour supporter le processus d'allocation dynamique des fonctions, dans le cadre de la conception et du pilotage de systèmes sociotechniques résilients. La première partie dresse un état de l'art critique sur les méthodes existantes et sur l'émergence d'un nouveau cadre théorique pluridisciplinaire. Les fondations d'une méthode d'allocation dynamique sont ensuite établies et outillées, s'appuyant sur le Cognitive Works Analysis (Rasmussen, 1986) et sur le concept d'opération issu des travaux d'ingénierie sur les systèmes reconfigurables (Frizon de Lamotte et al., 2007).

2. Etat de l'art et approche pluridisciplinaire

2.1. Limites et critiques de la gestion du processus d'allocation des fonctions

Quand un aléa survient dans un système fortement automatisé, on observe qu'il est difficile pour l'opérateur humain de reprendre les commandes du système. Il éprouve en effet des difficultés pour détecter le problème et pour intervenir dans la boucle de contrôle. Ce constat – établi dans de nombreux cas d'accidents – montre ainsi la prégnance de la question sur la répartition du travail entre l'homme et la machine dans la conception d'un système sociotechnique (Chauvin et Hoc, à paraître). Cela a conduit différents auteurs à proposer une philosophie de l'automatisation qui soit centrée sur l'homme et qui vise à faciliter les relations entre l'homme et la machine dans le contrôle et la gestion d'un système complexe. Cela permettrait en effet de penser très tôt le comportement des systèmes homme-machine face à des événements incertains, et donc d'améliorer la résilience de ces systèmes. Dans cette perspective, deux approches co-existent (Kaber et Endsley, 2004) :

1. une approche « statique » visant à optimiser la répartition des tâches entre l'homme et la machine. Cette approche définit différents niveaux d'automatisation (LOA : Parasuraman et al., (2000)) dont elle cherche à mesurer l'impact sur la performance globale du système mais aussi sur la charge de travail des opérateurs et sur la représentation qu'ils se font de la situation (Situation Awareness ou SA) ;
2. une approche « dynamique » visant à allouer différentes fonctions à l'homme ou à la machine en fonction des exigences de la situation (AA : Adaptive Automatisation ou DFA : Dynamic Function Allocation). Cette deuxième approche cherche donc à définir ce qui doit être automatisé, quand et comment il faut automatiser. Elle prône une allocation dynamique dépendant notamment de l'occurrence d'un événement critique, de la mesure de la performance et de l'évaluation de la charge de travail.

Quelques travaux cherchent à détailler cette question. la méthode KOMPASS (Grote et al., 2000), la méthode ORDIT (Strain et al., 2000)

ou encore la méthode de Dearden et al. (2000) proposent ainsi des approches participatives, intégrant à la réflexion les utilisateurs finaux du système conçu. Elles sont par ailleurs basées sur le principe de complémentarité, i.e. en favorisant le développement des capacités des agents humains et la compensation de leurs faiblesses, plutôt qu'en maximisant le potentiel d'automatisation.

Cependant, un certain nombre de critiques s'élèvent contre ces méthodes et la manière dont est traité le processus d'allocation des fonctions :

- La répartition du travail homme machine est une question très peu abordée dans les méthodes de conception générale et les récents travaux sur l'allocation des fonctions peinent à y être intégrés (Chauvin et Hoc, à paraître);
- Les approches de répartition du travail entre l'homme et la machine sont encore trop limitées au cas statique : l'allocation est très souvent supposée a priori et vue comme un choix d'automatisation figé une fois pour toutes et ne traite pas de la répartition dans des situations dynamiques (Chauvin et Hoc, à paraître).
- On assiste par ailleurs à un manque de consensus sur la formulation du problème d'allocation ; comme le précise Dearden et al. (2000), on peut arriver à un problème dual, faisant émerger deux questions non équivalentes : « à quels agents, humains ou techniques, doit on allouer la fonction considérée ? » et « à quelles fonctions, requises par le système dans un contexte donné, doit on allouer un agent ? ». On peut d'ailleurs critiquer ces formulations, où l'on traite l'allocation en bloquant dans chaque cas un des deux paramètres, une fonction ou un agent ; ceci ne peut alors amener qu'une réponse partielle au problème posé.

L'allocation des fonctions est donc un processus qui présente encore d'importantes limites, aussi bien sur des aspects méthodologiques (à « haut niveau », on assiste à une faible intégration dans la phase de conception) et opérationnels (à « bas niveau », on constate des lacunes pour traiter l'allocation dans des situations dynamiques).

2.2. Emergence d'un cadre théorique pour une allocation dynamique des fonctions, intégrée à la phase de conception

Comme le précisent Morel et al. (2008), il faut adopter une approche pluridisciplinaire, afin de mieux supporter ce processus d'allocation dès la phase de conception. Ainsi, si l'on veut lever les verrous méthodologiques et pratiques exposés *supra*, les concepts, les modèles et les méthodes issus de l'ergonomie et des sciences cognitives (coopération homme-machine, analyse des situations de travail, « joint cognitive systems ») devront être confrontés et croisés avec ceux issus des sciences pour l'ingénieur (ingénierie système, sûreté de fonctionnement, automatique).

Dans cette perspective, la convergence de deux courants scientifiques semble prometteuse à étudier :

- sur les aspects méthodologiques de « haut niveau », le Cognitive Work Analysis propose une approche de conception intégrée, mêlant les apports de l'ingénierie et ceux des facteurs humains. Le CWA est en effet utile pour décrire les systèmes sociotechniques en termes de fonctions et d'objectifs à atteindre, mais également en termes de contraintes s'appliquant sur l'activité des opérateurs (les stratégies des acteurs, les décisions, ainsi que les aptitudes cognitives requises sont ici considérées). Le CWA comporte cinq étapes qui se succèdent :
 1. *L'analyse du domaine de travail* vise à définir l'objet de l'action ainsi que ses contraintes (WDA). Cette première étape est implémentée avec un outil proposé par Rasmussen (1986) : la double hiérarchie d'abstraction. Cet outil permet de décomposer un domaine de travail à la fois en termes de « tout et parties » - suivant une hiérarchie de raffinement- et de « fins (objectifs, buts) et moyens (pour parvenir au but) » - suivant une hiérarchie de mise en œuvre.
 2. *L'analyse de la tâche de contrôle (ConTA)* a pour but d'identifier ce qui doit être fait. L'outil utilisé pour réaliser cette deuxième étape est « l'échelle de double de décision » proposé par Rasmussen (1986), lequel complète son modèle initial « Skills, Rules, Knowledge » (SRK). Il s'agit d'un gabarit permettant de représenter de manière simplifiée les activités de traitement de

l'information sans préjuger de la manière dont le traitement est réalisé.

3. *L'analyse des stratégies (StrA)* porte sur les différentes manières possibles de réaliser les activités identifiées lors de l'analyse des tâches. Différents ordonnancements de tâches peuvent être envisagés.
4. *L'analyse socio-organisationnelle (SOCA)* a pour but de déterminer la répartition des exigences de la tâche entre les acteurs. Elle consiste à définir la répartition des rôles ou des fonctions. Cela consiste à attribuer à différents acteurs (acteur humain, groupe d'acteurs et automatismes) :
 - a. La responsabilité des différents secteurs du domaine apparaissant dans la hiérarchie d'abstraction ;
 - b. Les différentes activités qui figurent sur la double échelle de décision ;
 - c. Les différentes stratégies identifiées.

Cette analyse est réalisée à partir des six critères définis par Rasmussen et al. (1994) :

- a. La compétence des acteurs ;
 - b. L'accès aux informations et aux moyens d'action ;
 - c. Les exigences de la coordination ;
 - d. La charge de travail ;
 - e. La sécurité et la fiabilité ;
 - f. Les règlements existants.
5. *L'analyse des compétences (WCA)* doit permettre d'identifier les compétences d'un opérateur idéal.

- sur les aspects opérationnels de « bas niveau », de récents travaux ont montré l'intérêt d'aborder la question de l'allocation des fonctions dans le cadre particulier des systèmes reconfigurables (Frizon de Lamotte et al., 2007) : ce type de système peut en effet s'adapter à des situations dynamiques et modifier sa structure lors de l'exécution, de telle sorte que les composants non défaillants délivrent un service

acceptable pour réaliser les fonctions demandées. Ce traitement de l'allocation basée sur la reconfiguration renvoie, d'une manière très précise, à l'utilisation du concept d'opération. Développée par (Toguyeni et Berruet, 2003) sur le cas des systèmes manufacturiers, une opération est définie comme la mise en oeuvre d'une fonction (technique) par une ressource (technique) considérée comme un composant du système. Ce concept peut cependant être élargi au cas des ressources humaines et des fonctions cognitives (Morel et al., 2008). Jenkins et al. (2008) se sont ainsi intéressés à l'allocation des fonctions en partant du concept de reconfiguration dans le cadre du CWA. Ils ont ainsi déployé la méthode CWA en interconnectant les différentes phases pour concevoir des interfaces reconfigurables au sein d'un réseau complexe (domaine d'application : micro monde contrôle-commande). Selon ces auteurs, en mettant l'accent sur les contraintes du réseau, il est possible d'agir sur la flexibilité de ce dernier. Le cadre du CWA permet de capturer toutes les configurations et reconfigurations physiquement possibles au sein du réseau (i.e. espace des possibles).

L'émergence de ce cadre théorique pluridisciplinaire ouvre ainsi la voie vers une méthode d'allocation des fonctions à la fois plus intégrée dans les méthodes de conception générale (grâce au CWA) et à la fois plus opérationnelle et permettant de traiter ce problème dans des situations dynamiques (grâce à l'approche des systèmes reconfigurables centrée sur le concept d'opération). Cela permettrait d'aboutir à une conception rendant le couplage homme/machine optimal quelle que soit la situation, et garantissant la sécurité et la disponibilité des systèmes complexes.

3. Vers une méthode d'allocation dynamique des fonctions intégrée à la phase de conception

Nos contributions se situent sur trois axes :

- Axe conceptuel : une modélisation des systèmes sociotechniques permet de positionner le concept d'opération et d'identifier les contraintes qui viendront se poser sur le processus d'allocation des fonctions ;
- Axe méthodologique : une méthode d'allocation des fonctions intégrée au CWA est construite, afin de lister les contraintes et de

déterminer l'espace admissible des opérations candidates à l'allocation;

- Axe instrumental : une représentation algébrique du concept d'opérations permet d'outiller la méthode d'allocation. Elle aide le concepteur à encapsuler les différentes contraintes et à « dessiner », de manière matricielle, l'espace admissible.

3.1. Modélisation des systèmes sociotechniques centrée sur le concept d'opération

Au travers d'un modèle entité-relation (cf. figure 1), nous avons cherché à intégrer les principes issus de l'ergonomie à un cadre d'analyse systémique, afin de faire converger les visions des technologues et des ergonomes. Nous nous sommes notamment appuyés sur la notion de mondes, développée par Gero et al. (2004).

Ceci nous permet de détailler une représentation multi-points de vue des systèmes sociotechniques : à l'analyse des « concepteurs » (définition de la structure et du comportement « physique » du système), doivent s'ajouter celle des « prescripteurs » (définition des stratégies et des modalités de mise en œuvre) et celle des « utilisateurs » (prise en compte de la situation, écarts entre la tâche prescrite et la tâche réelle lors de l'activité du système).

Nous avons également positionné le concept d'opération dans ce modèle : celui-ci peut être défini comme la mise en œuvre d'une fonction (physique ou cognitive) par une ressource (technique ou humaine).

Il permet donc de traduire le problème d'allocation des fonctions en problème de choix d'opérations sous contraintes. Nous avons identifié les éléments qui peuvent contraindre le choix des opérations. Ces contraintes sont par exemple :

- le choix des ressources et leurs dimensionnements (vue « concepteur ») ;
- les modes de traitement cognitif de la tâche et les missions types (vue « prescripteur ») ;
- les événements représentatifs de la situation rencontrée par le système et les capacités dynamiques des ressources (vue « utilisateur »).

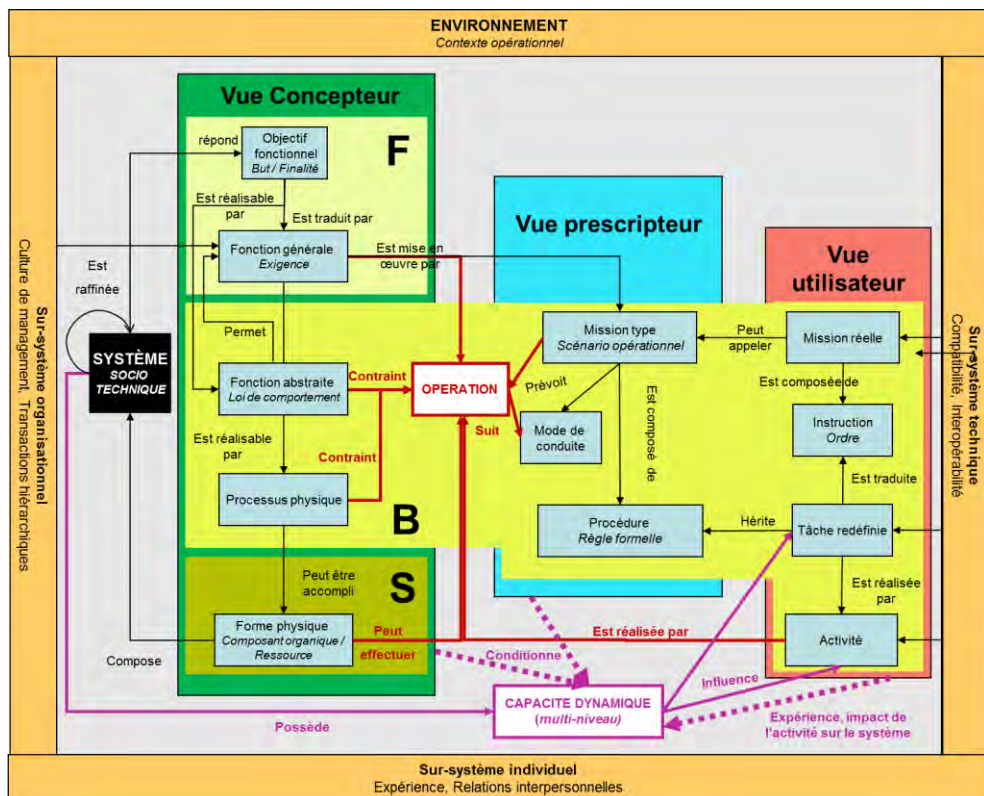


Figure 1. Modèle FBS-HMO centrée opération

3.2. Méthode d'allocation dynamique des fonctions intégrée au CWA

Partant de la modélisation précédente, nous avons cherché à construire une méthode d'allocation dynamique des fonctions qui s'inscrit dans le CWA et qui permet de lister et de modéliser les contraintes subies par le système (cf. Fig.2).

- *Etape 1 – Modéliser le SST et son environnement* : il s'agit tout d'abord pour le concepteur de faire une analyse structuro-fonctionnelle du système à concevoir, grâce à la hiérarchie d'abstraction proposée par Rasmussen pour l'analyse du domaine

(WDA). Une liste des facteurs contextuels perturbant le système devra également être dressée.

- *Etape 2 – Modéliser les opérations potentielles* : l'analyse du domaine effectuée par les concepteurs peut être traduite en termes d'opérations potentielles. Ces opérations correspondent à tous les couples fonction-ressource que le concepteur permet, lorsqu'il projette le fonctionnement du système. Certaines opérations ne seront au contraire pas possibles. Par exemple, un conducteur ne pourra pas décider et contrôler la sortie de son airbag, qui sera automatiquement déclenché suite à un choc important ; à l'inverse, seul le conducteur pourra activer ou désactiver l'airbag si un siège auto est côté passager, cela ne pourra se faire automatiquement.
- *Etape 3 – Modéliser les contraintes et leurs activations contextuelles* : La compréhension des processus cognitifs relatives au contrôle de la tâche et à l'exécution des tâches, ainsi que l'évaluation des capacités maximales des agents du système, va permettre d'activer ou désactiver certaines opérations potentielles (telles que prévues par le concepteur). Ces contraintes pourront être analysées et listées à l'aide des dernières étapes du CWA (ConTA et StrA pour les processus cognitifs, SOCA et WCA pour l'analyse des capacités). Leurs activations, en fonction des facteurs contextuels établis dans l'étape 1, devront également être modélisées. Par exemple, le régulateur de vitesse restera actif si une personne accélère pendant un court laps de temps ; au contraire, le régulateur se désactivera si une personne freine, pour éviter toute collision lorsque le frein sera relâché.
- *Etape 4 – Modéliser les opérations admissibles* : Les différentes contraintes de l'étape 3 se répercuteront, en fonction de la situation, désactivant certaines opérations potentielles. A chaque contexte correspondra donc un ensemble d'opérations admissibles, sur lequel se fera ensuite l'allocation des fonctions.
- *Etape 5 – Allouer les fonctions* : Le choix des opérations parmi l'ensemble des opérations admissibles se fera en fonction de critères,

défini par l'étape SOCA du CWA (charge de travail, performance, capacité dynamique des agents...)

- *Etape 6 – Valider la conception* : les différents choix des concepteurs à chaque étape pourront être éprouvés à l'aide d'un scénario. Si l'allocation dynamique échoue (i.e. s'il n'existe pas de solutions satisfaisant les critères dans l'espace des opérations admissibles dans plusieurs situations), la résilience du système diminuera. Le concepteur pourra donc être amené à des modifications, afin de diminuer ces échecs.



Figure 2. Méthode d'allocation dynamique des fonctions

3.3. Instrumentation la méthode d'allocation des fonctions

Afin de mettre en œuvre la méthode d'allocation dynamique des fonctions, nous avons proposé une boîte à outils algébrique.

- *Etapes 1&2* : Les opérations potentielles (issues de la vision technique et de l'analyse structuro-fonctionnelle du concepteur) peuvent ainsi être stockées dans une matrice Fonctions-Ressources. Le niveau de granularité de ces éléments est un point primordial dans la modélisation des opérations. Il faut considérer les couples tels que les fonctions puissent être réalisées complètement par au moins une ressource.

Matrice des opérations potentielles	Ressource Humaine	Ressource Technique
Activation Airbag	1	0
Sortie Airbag	0	1
Désactivation régulateur	1	1

- *Etape 3* : Par ailleurs, les contraintes qui pourront se poser sur cette matrice d'opérations potentielles – et leur activation – peuvent également être stockées sous forme matricielle. Une matrice contrainte binaire pourra être définie comme une matrice dont tous les coefficients sont à 1, à l'exception des opérations dégradées par la situation.

Matrice contrainte A	Ressource Humaine	Ressource Technique
Activation Airbag	1	1
Sortie Airbag	1	1
Désactivation régulateur	1	0

Matrice activation	Contrainte A	Contraintes B, C...
Siège Auto côté passager	0	...
Accélération	1	...

- *Etape 4* : L'application de ces matrices de contraintes contextuelles sur la matrice des opérations potentielles permettra donc de définir la matrice des opérations admissibles. Cette matrice pourra être obtenue selon la formule suivante (suivant les produits matriciels booléens conjonctifs et disjonctifs):

$$M_{admissible}(S) = M_{potentielle} \wedge V_i(a_i(S) * M_{contrainte_i})$$

avec $M_{potentielle}$ la matrice d'opération potentielle,
 $S=S1 \cap S4 \dots$ la situation rencontrée à un instant t par le système,
 a_i les coefficients de la matrice d'activation contextuelle des contraintes,
et $M_{contrainte_i}$ les matrices de contraintes

- *Etape 5.* L'allocation des fonctions dans le cadre d'une situation dynamique revient donc à résoudre à chaque situation S , le problème suivant :

$\forall S, \quad \begin{array}{l} \text{Min CritèresAF}(Mopérations) \\ \text{s.c. } Mopérations \leq Madmissible(S) \end{array}$
--

avec CritèresAF une fonction de critères d'allocation (charge de travail,
risque d'accident, ...)
et Mopération la matrice solution du problème d'allocation.

- *Etape 6.* La validation pourrait ensuite s'effectuer en comptant le nombre de fois que l'allocation n'a pas généré de solutions satisfaisantes lors d'un scénario. On aurait alors une vision globale du comportement du système et de sa capacité d'adaptation et de résistance à des situations plus ou moins pressantes. Cela fournit d'une certaine manière une image de la résilience du système.

4. Discussion et ancrage industriel

Ces différents éléments posent les fondations pour le développement d'un logiciel d'aide à la conception, donnant aux concepteurs des critères issus de l'ergonomie et une estimation de la résilience en vue d'améliorer les systèmes. Il permettra la simulation d'une allocation des fonctions sur un ensemble d'évènements scénarisés. Il reposera sur les principes illustrés sur la Figure 3.

A noter que l'allocation des fonctions a un impact sur l'état des ressources et leurs capacités dynamiques (cela n'est pour l'instant pas traité et nécessite des modèles prédictifs, par exemple pour la charge de travail ou pour l'apprentissage).

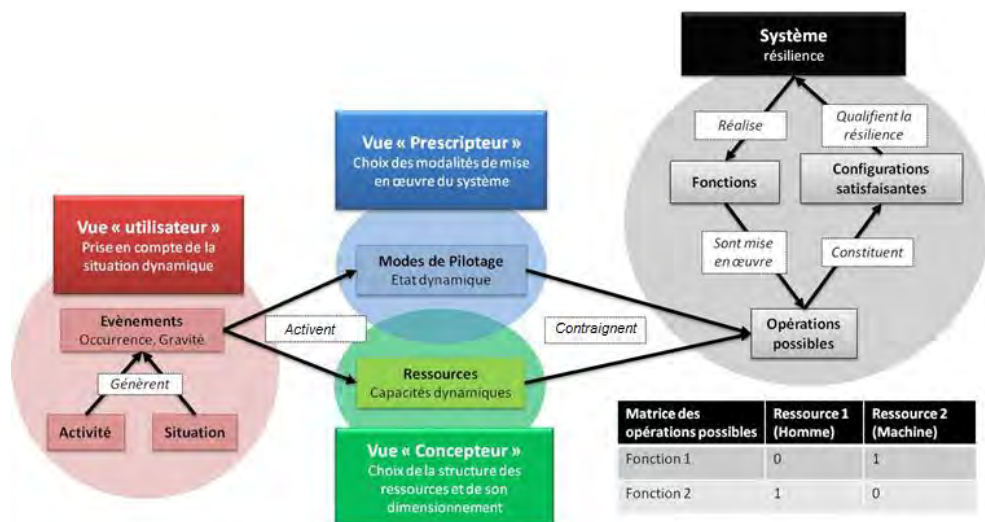


Figure 3. Principe du démonstrateur

D'autre part, la problématique abordée se place dans le cadre d'un partenariat industriel : un travail est actuellement mené avec DCNS Lorient sur la conception des postes de conduite des sous-marins, qui sont des systèmes sociotechniques très contraints, où la résilience est une propriété vitale. Cette collaboration se concrétise notamment par une thèse CIFRE. Celle-ci permet notamment de mieux comprendre ce système sociotechnique particulier (analyse de l'activité, analyse technique des systèmes en termes de contrôle commande) et de fournir un cadre expérimental indispensable à nos travaux. Elle traduit d'autre part un lien recherche-industrie établi de longue date (le projet régional PSES associant Sydel et DCNS avait auparavant initié ces travaux en 2008) dans le domaine maritime et dans la région Bretagne. Des actions scientifiques sont également menées avec d'autres industriels (compagnies de ferries, pêche industrielle), afin d'ancrer ces travaux sur l'allocation des fonctions et sur la résilience dans un contexte industriel local très porteur.

5. Conclusion

Les travaux présentés s'inscrivent dans une démarche pluridisciplinaire. Chercheurs en ingénierie système et en ergonomie, nous mutualisons nos approches respectives pour créer des méthodes et outils d'aide à la conception et au pilotage de systèmes sociotechniques. Cette convergence est nécessaire : il faut décloisonner le domaine de la conception, qui ne saurait rester uniquement technique et l'on doit intégrer les apports de l'ergonomie dans un cadre systémique robuste. Cela permet notamment une réflexion plus aboutie sur le processus d'allocation dynamique des fonctions. D'autre part, la recherche s'inscrit dans un contexte industriel local. La synergie des scientifiques et des acteurs économiques contribue ainsi au développement et au rayonnement du territoire.

6. Références

Baxter, G. & Sommerville, I. (2011). Socio-technical systems: From design methods to systems engineering. *Interacting with Computers*, 23, 4-17.

Wreathall, J. (2006). Properties of resilient organizations: an initial view. In E. Hollnagel, D.D. Woods & N. Leveson (Eds.), *Resilience Engineering: concepts and precepts* (pp. 258-268). Aldershot, UK: Ashgate publishing.

HOC J. M. (1996) Supervision et contrôle de processus, la cognition en situation dynamique. PUG, collection Sciences et Technologies de la Connaissance.

Chauvin C., Hoc J.M. (à paraître), intégration de l'ergonomie dans la conception des systèmes homme-machine , dans P. Millot (Ed.) *Ergonomie des systèmes homme machine*. Paris : Hermès

Frizon de Lamotte F., Berruet P. Philippe J.L. (2007), Using model engineering for the criticality analysis of reconfigurable manufacturing systems architectures, *International Journal on Manufacturing Technology and Management Special issue on manufacturing under changing environment*, Volume 11, Issue 3/4, 2007.

Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004) The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload

in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(2), pp.113-153.

Parasuraman R., Sheridan T., Wickens C. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE transactions on systems, man and cybernetics: part A*. 30(3). pp. 286-297

Grote, G., Ryser, C., Wafler, T., Windischer, A., & Weik, S. (2000). KOMPASS: A method for complementary function allocation in automated work systems. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52, 267-287.

Strain, J., & Eason, K. (2000). Exploring the implications of allocation of function for human resource management in the Royal Navy. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52, 319–334.

Dearden, A., Harrison, M., & Wright, P. (2000). Allocation of function: scenarios, context and the economics of effort. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52, 289–318.

Morel, G., Berruet, P., Chauvin, C., Rossi, A. (2008). Concevoir des systèmes sociotechniques complexes résilients et reconfigurables au profit de la sécurité et de la disponibilité. *Actes du congrès international ERGO'IA*, 14-17/10, Bidart.

Rasmussen, J. (1986). *Information Processing and Human-machine Interaction*. Amsterdam, North Holland: Elsevier.

Rasmussen, J., Pejtersen, A.M., & Goodstein, L.P. (1994). *Cognitive Systems engineering*. New York: Wiley.

Toguyeni, P. Berruet, E. Craye, " Models and algorithms for failure diagnosis and recovery in FMS", *Int. J. of Flexible Manufacturing Systems*, Vol 15, N°1, January 2003, pp. 57-85.

Jenkins, D.P., Stanton, N.A., Walker, G.H., Salmon, P.M., Young, M.S. (2008). Applying cognitive work analysis to the design of rapidly reconfigurable interfaces in complex networks. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 9(4),273-295.

Gero J.S., Kannengiesser U.; The situated Function-Behaviour-Structure framework, *Design Studies* Volume 25 Issue 4, pp.373-391, 2004